

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Reducción del consumo de agua en una fábrica de alimentos”

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO INDUSTRIAL

Presentado por:

Michael Eduardo Urgilés Castro

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2017

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios, que me ha dado la fortaleza para continuar adelante. A mis padres, a mi familia, a mi enamorada y en especial a mi abuela por ser un apoyo incondicional en cada paso de mi vida. A mi tutor, a mis profesores por su tiempo y los conocimientos que me han brindaron a lo largo de la carrera y a mis compañeros de promoción que siempre estuvieron ahí para apoyarme.

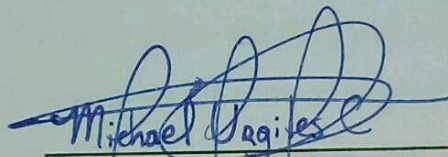
DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la Materia Integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Michael E. Urgilés Castro

Ph.D. Jorge Abad Morán

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



Michael Urgilés Castro
AUTOR



Ph.D. Jorge Abad Morán
**TUTOR DE MATERIA
INTEGRADORA**

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo identificar las áreas de mayor consumo de agua en una empresa de alimentos e identificar los desperdicios más significativos de este recurso. Proyectos de mejora se realizaron para reducir el consumo de agua por tonelada de producción.

En el primer capítulo se define el problema a resolver, el cual se relaciona con el indicador de agua de la empresa, se plantean objetivos y se da una breve descripción de la metodología DMAIC utilizada en el proyecto. El segundo capítulo detalla la metodología utilizada en sus cinco etapas. En su fase definir, se identificaron las necesidades del cliente, traduciéndolas a variables relevantes al problema. Para la fase de medición, se recolectan datos asociados a las variables de interés. En la fase de análisis, mediante equipos de trabajo conformados por personal operativo y técnico se establecen las causas. Para la fase de mejorar, se establecieron propuestas de mejora para las causas que generan el mayor impacto al indicador de agua. Y, por último, se desarrollaron controles operacionales que aseguren los resultados de las mejoras implementadas a través del tiempo.

Con la implementación de un sistema de recirculación parcial de agua en bombas de vacío y la definición de sus parámetros de funcionamiento como: volumen de recirculación, tasa de transferencia de calor y la temperatura inicial del líquido de servicio, se simuló el proceso utilizando el software Labview, obteniéndose como resultado una reducción del consumo de agua.

Como resultado de este proyecto, el ahorro en consumo de agua es de un 79% para el área de limpieza, el cual contribuye con una disminución del indicador total de agua en un 8%, pasando de 1,65 m³/Ton a 1,52 m³/Ton.

Palabras Claves: Agua, Reducción, Consumo. DMAIC, KPI

ABSTRACT

The project objective is to identify areas of high water consumption in a food processing company in order to identify where the water waste is and to develop improvement projects to reduce the consumption of water per ton of production.

The first chapter deals with the problem that have to be solved which is related with the company key performance indicator (KPI) of water also give a brief description of the methodology to be used in this project. The second chapter is divided into five steps: following DMAIC methodology. Definition step deals with the identification of the variables to be followed and the collection of this data. In the measurement step consumption water data is collected and main area of water consumption are identified. The third step is the analysis part, where the root causes of the problem are found. In the fourth step, solutions are proposed to reduce water consumption and improve water KPI. Finally chart controls are proposed to help maintain performance in the long term.

The implementation of a partial water recirculation system in the vacuum pump and the definition of its operating parameters such as recirculation volume, heat transfer rates and service liquid temperature will produce a water reduction consumption. This process was simulated using Labview software.

As a result of this project water consumption reduction is by 79% in the factory cleaning area. Its contributes to improve the water KPI in 8% from 1,65 m³/Ton to 1,52 m³/Ton.

Keywords: *Water, Reduction, Consumption, DMAIC, KPI*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.2.3 Alcance.....	2
1.3 Marco teórico.....	3
1.3.1 Lean	3
1.3.2 Six sigma	3
1.3.3 DMAIC	3
1.3.4 Voice of Costumer (VOC)	4
1.3.5 Diagrama SIPOC.....	4
1.3.6 Diagrama de Pareto	5
1.3.7 Diagrama Causa-Efecto	5
1.3.8 Técnica de cinco ¿Por qué?	5
1.3.9 Bombas de vacío de anillo líquido	5
CAPÍTULO 2.....	6
2. Metodología	6

2.1	Definir	6
2.2	Medir	10
2.3	Analizar	18
2.4	Mejorar	21
2.4.1	Sistema actual en bombas de vacío para preparación de mostaza	25
2.4.2	Recirculación parcial de agua en bombas de vacío para preparación de mostaza	27
2.5	Control.....	32
2.5.1	Check List de Arranque	32
2.5.2	Carta de control para reposición de agua.....	33
CAPÍTULO 3.....		34
3.	Resultados.....	34
3.1	Simulación del proceso actual.....	34
3.2	Simulación del proceso de mejora.....	35
3.3	Comparación de resultados.....	37
3.4	Evaluación financiera	39
CAPÍTULO 4.....		42
4.	Discusión y Conclusiones.....	42
4.1	Conclusiones.....	42
4.2	Recomendaciones.....	42
REFERENCIAS		44
ANEXOS.....		46

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
KPI	Key Performance Indicator. (Indicadores claves de desempeño)
VOC	Voice of Costumers (Voz del Cliente)
SIPOC	Supplier, Input, Proccess, Output, Customer (Proveedor, Entrada, Procesos, Salida, Cliente)
DMAIC	Define, Measure, Analyze, Improve & Control (Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Control)
TBP	Tiempo Bueno de Producción
IPA	Identificación de Proyectos e Asignación
CTQ	Critical to Quality (Parámetros críticos de calidad)
MOD	Mano de Obra Directa
TDS	Total Dissolved Solid (Sólidos disueltos totales)
RO	Reverse Osmosis (Osmosis Inversa)
IC	Intervalo de Confianza
VAN	Valor Actual Neto
TIR	Tasa Interna de Retorno

SIMBOLOGÍA

Ltr	Litro
m ³	Metro cúbico
sec	Segundo
min	Minuto
Ton	Tonelada
Kg	kilogramo
K	Grados kelvin
°C	Grados centígrados
V	Voltio
kJ	kiloJoule
kW	kilovatio
HP	Horse Power (Caballo de fuerza)
μ	Media muestral
σ	Varianza muestral

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Serie de tiempo para el KPI de agua.....	6
Figura 2.2 Carta de control KPI de agua semanal.....	8
Figura 2.3 Capacidad del proceso de consumo de agua	8
Figura 2.4 Correlación entre variables.....	10
Figura 2.5 Pareto de consumo de agua por área	11
Figura 2.6 Consumo de agua en el área de limpieza	12
Figura 2.7 Correlación entre m ³ y volumen de producción del área	13
Figura 2.8 Consumo real versus esperado en bombas de vacío.....	14
Figura 2.9 Consumo real versus esperado en calderos.	15
Figura 2.10 Consumo real versus esperado en receta.....	16
Figura 2.11 Carta de control para reposición de agua en torre.	16
Figura 2.12 Producción semanal. Enero-Julio 2017	17
Figura 2.13 Bombas de vacío. Causa Raíz No 1	20
Figura 2.14 Puntos de limpieza. Causa Raíz No 6.....	20
Figura 2.15 Identificación y asignación de proyectos (IPA)	21
Figura 2.16 Matriz de priorización de soluciones.....	25
Figura 2.17 Sistema actual de bombas de vacío	26
Figura 2.18 Prueba de normalidad para tiempos de llenado	27
Figura 2.19 Propuesta de mejora para recirculación en bombas de vacío	28
Figura 2.20 Prueba de normalidad para tasa de transferencia de calor	31
Figura 2.21 Prueba de normalidad para temperatura de líquido de servicio	32
Figura 2.22 Check list de arranque.....	32
Figura 2.23 Carta de control para reposición de agua por hora	33
Figura 3.1 Simulación del proceso actual en bombas de vacío.....	34
Figura 3.2 Prueba de normalidad para resultados de simulación actual	35
Figura 3.3 Simulación del proceso de mejora usando LabView	36
Figura 3.4 Prueba de normalidad para resultados de simulación.....	37
Figura 3.5 Prueba T-pareada para diferencia de medias	38
Figura 3.6 Diagrama de cajas para diferencia de medias	38
Figura 3.7 Resultado de simulación con y sin recirculación	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Comparación entre KPI agua	6
Tabla 2.2 Datos semanales de agua y producción.....	7
Tabla 2.3 Matriz VOC	9
Tabla 2.4 Plan de recolección de datos.....	9
Tabla 2.5 Tiempo de producción para bombas de vacío.....	13
Tabla 2.6 Reposición de agua en calderos en m ³	14
Tabla 2.7 Consumo de agua por receta	15
Tabla 2.8 Principales problemas por área.	17
Tabla 2.9 Producción Semanal 2017.....	18
Tabla 2.10 Causas raíces de los principales problemas	19
Tabla 2.11 Verificación de causas raíces	20
Tabla 2.12 Soluciones a causa raíces	22
Tabla 2.13 Evaluación por impacto al indicador de agua de fábrica.....	23
Tabla 2.14 Evaluación por costos de implementación.....	24
Tabla 2.15 Tiempos de llenado	26
Tabla 2.16 Variables del modelo de recirculación	29
Tabla 2.17 Tasa de transferencia de calor	30
Tabla 2.18 Datos de temperatura inicial de líquido de servicio.....	31
Tabla 3.1 Resultados de simulación. Estado Actual.....	34
Tabla 3.2 Parámetros de simulación del proceso de mejora	35
Tabla 3.3 Resultados de simulación. Mejora propuesta	36
Tabla 3.4 Horas de uso y costos asociados	39
Tabla 3.5 Inversión inicial, costos fijos y variables	40
Tabla 3.6 Flujo neto de efectivo.....	41
Tabla 3.7 Indicadores financieros.....	41

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El agua impacta en todos los aspectos de la vida en la tierra, desde el aire que se respira hasta el interior de las células que componen a cualquier ser vivo, además de regular el clima y la temperatura del planeta. Como tal, es uno de los recursos más relevantes para la humanidad, esencial para todas las actividades sociales, económicas y ambientales. A pesar de ser un recurso renovable debido al ciclo hídrico que ocurre en la naturaleza, posee un límite en la cantidad anual que puede regenerarse. (Perlman, 2017), indica que el 97,24% de agua en la tierra se encuentra en los océanos y mares como agua salada, y únicamente el 2,76% restante es agua dulce, de la cual el 0,4% circula por las cuencas hidrográficas en forma de arroyos y ríos, para luego depositarse en lagos, lagunas y en otros cuerpos superficiales de agua. Todas las organizaciones industriales y comerciales hacen uso del agua, en especial las industrias del sector alimenticio en las cuales se utiliza este recurso como materia prima o como parte de procesos como limpieza, generación de vapor, o enfriamiento. Por esto es de vital importancia que su uso sea realizado de forma racional y eficiente, asegurando así la mínima contaminación y el desarrollo sostenible dentro y fuera de nuestra ciudad. (WRAP, s.f) afirma:

“Las organizaciones no saben cuánto están usando o que por utilizando el agua más eficientemente podrían reducir lo que pagan por el suministro de agua y los efluentes generados. Sitios que no han intentado previamente reducir el consumo de agua, a menudo puede reducir su factura de efluentes hasta en un 30% combinando oportunidades de reducción, reciclaje y reutilización del líquido”.

La encuesta del (INEC, 2012) indica que, el consumo promedio de agua para la provincia del Guayas es de 31,11 m³ por familia. La empresa objeto de estudio consumió para el año 2016 cerca de 55.460 m³ de agua, la cual es suministrada desde la red pública de la ciudad de Guayaquil y equivale al consumo promedio mensual de 4.560 familias aproximadamente.

1.1 Descripción del problema

Una forma que posee la empresa para controlar el consumo de los recursos necesarios para su operación es a través de indicadores claves de rendimiento (KPI¹ por sus siglas en inglés). Dada su política de desarrollo sostenible y sustentable el KPI agua, que se define como el volumen de agua (m³) necesaria para la producción de una tonelada de producto efectiva, es uno de las más importantes desde el punto de vista ambiental. Luego de implementar varios proyectos de ahorro en agua el año anterior, el indicador reportado entre los meses de enero a mayo de 2017 se encuentra en 1,65 m³/Ton., lo cual representa un 10% más del consumo esperado para una empresa con su nivel de producción. El consumo esperado es de 1,52 m³/Ton.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Identificar oportunidades de ahorro que disminuyan el consumo de agua y reduzcan su desperdicio en los principales procesos de la fábrica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Crear el mapa de aguas de la fábrica
- Reducir el consumo total de agua entre un cinco y diez por ciento.
- Mejorar la recopilación y gestión de datos de consumo de agua.

1.2.3 Alcance

El alcance incluye a todos los consumidores de agua dentro de las instalaciones de la fábrica como procesos productivos, limpiezas, generación de vapor en calderos, circuito de torre de enfriamiento, ablandadores, osmosis inversa y edificio social.

¹ KPI: “Concepto fundamental en la gestión basada en procesos que permite medir y cuantificar el rendimiento de los mismos, indicando el valor añadido que se ha conseguido sobre la entrada y analizar si los objetivos iniciales se han cumplido” (Mestres, 2014).

1.3 Marco teórico

1.3.1 Lean

“La filosofía Lean se basa en la eliminación o reducción de todo desperdicio organizacional, entendiendo por desperdicio, toda actividad que no añade ningún tipo de valor al producto o servicio final” (UPC, 2010).

1.3.2 Six sigma

Seis sigmas (6σ) es una estrategia de mejora continua fundamentada en las herramientas y el pensamiento estadístico que busca mejorar el desempeño de los procesos de una organización y reducir su variación; con ello, es posible encontrar y eliminar las causas de los errores, defectos y retrasos en los procesos. (Gutiérrez, 2009)

1.3.3 DMAIC

Según (Montgomery, 2009): *“Metodología estructurada en cinco pasos que se utiliza en la resolución de problemas que puede ser usada para completar proyectos con gran éxito mediante el desarrollo e implementación de soluciones enfocadas a resolver causas raíces del proceso, estableciendo prácticas que garanticen su completa eliminación”*.

- **Definir**

En este primer paso se busca identificar la oportunidad de mejora para el proyecto y verificar o validar la relevancia para las partes interesadas de llevarlo a cabo. Un proyecto debe de ser importante tanto para los clientes como para el negocio.

Entre las herramientas claves para esta fase, se encuentran: Project charter², VOC, SIPOC.

- **Medir**

El propósito de este paso es evaluar y comprender el estado actual del proceso. Esto involucra la recopilación de datos sobre medidas de calidad, costo y tiempo de procesamiento. Es importante desarrollar una lista de todas las

² **Project charter:** Herramienta de planeación en la cual se delimita el alcance, definen necesidades de clientes y objetivos, establecen entregables, y asignan responsabilidades del proyecto. (García, 2013)

variables clave de entrada de proceso y las variables clave de salida de proceso.

- **Analizar**

En el paso de análisis, el objetivo es utilizar los datos del paso de medida para comenzar a determinar las relaciones de causa y efecto en el proceso y comprender las diferentes fuentes de la variabilidad. En otras palabras, en el paso de análisis queremos determinar las causas potenciales de los defectos, problemas de calidad, problemas del cliente, tiempo de ciclo y problemas de rendimiento, o residuos e ineficiencia que motivaron el proyecto. Es importante separar las fuentes de variabilidad en causas comunes y causas asignables.

- **Mejorar**

En el paso de mejorar, recurren al pensamiento creativo sobre los cambios específicos que se pueden hacer en el proceso y otras cosas que se pueden hacer para tener el impacto deseado en el rendimiento del proceso.

- **Control**

Los objetivos del paso de control son completar todo el trabajo restante en el proyecto y entregar el proceso mejorado al dueño del proceso junto con un plan de control de proceso y otros procedimientos necesarios para asegurar que las ganancias del proyecto serán institucionalizadas.

1.3.4 Voice of Customer (VOC)

La voz del cliente (VOC por sus siglas en inglés) es un proceso utilizado para capturar los requisitos del cliente (interno o externo) e intentar proporcionar la mejor calidad de servicio/producto en su clase. Usualmente los datos se capturan a través de entrevistas, encuestas, focus groups, observaciones e informes de campos. (Cyger, s.f)

1.3.5 Diagrama SIPOC

Los diagramas SIPOC³ (por sus siglas en inglés) proporcionan una visión general simple de un proceso y son útiles para comprender y visualizar elementos básicos del mismo. (Montgomery, 2009)

³ **SIPOC**: Supplier, Input, Process, Output, Customer.

1.3.6 Diagrama de Pareto

Según (Gutiérrez, 2009):

“El diagrama de Pareto es un gráfico especial de barras cuyo campo de análisis o aplicación son los datos categóricos, y tiene como objetivo ayudar a localizar el o los problemas vitales, así como sus principales causas con base al principio de que, pocos elementos (20%) generan la mayor parte de defectos (80%), y el resto de los elementos propician muy poco de los defectos totales”.

1.3.7 Diagrama Causa-Efecto

El diagrama de causa-efecto o Ishikawa⁴ es un método gráfico que relaciona un problema o efecto con los factores o causas que posiblemente lo generan. La importancia de este diagrama radica en que obliga a buscar las diferentes causas que afectan el problema bajo análisis y, de esta forma, se evita el error de buscar de manera directa las soluciones sin cuestionar cuáles son las verdaderas causas. (Gutiérrez, 2009)

1.3.8 Técnica de cinco ¿Por qué?

Herramienta utilizada para determinar la causa básica de un problema, al enfocarse hacia el proceso más que hacia las personas. El procedimiento es describir el problema en términos específicos, para entonces preguntar ¿por qué? (Besterfield, 2009)

1.3.9 Bombas de vacío de anillo líquido

La bomba de vacío de anillo líquido es una forma específica de bomba rotativa de desplazamiento positivo que utiliza líquido como elemento principal en la compresión de gas. La compresión se realiza mediante un anillo de líquido formado como resultado de la excentricidad relativa entre la carcasa de la bomba y un impulsor multiusos giratorio.

⁴ El diagrama de Ishikawa fue inventado por Kaoru Ishikawa, quien fue pionero en técnicas de gestión de calidad en Japón en los años sesenta. El diagrama se considera una de las siete herramientas básicas del control de calidad. (Cheong Wong, 2011)

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La metodología a utilizar en el presente trabajo es Six Sigma, enfocada en la mejora continua, por esta razón se utiliza la herramienta DMAIC, la cual consiste en 5 fases:

2.1 Definir

En la primera fase se definió el problema, el cual es detallado en el capítulo 1 en la sección de declaración del problema. Por políticas de gestión propias de la empresa es inevitable manejar el consumo de recursos naturales de forma responsable, en el presente proyecto es el agua para ser más específicos. Es por esto que, por medio de Benchmarking con empresas de la región dedicadas a la elaboración de productos similares y con igual nivel de producción (25.000 Ton/año) se realizó una comparación entre indicadores de consumo de agua como se muestra en la Tabla 2.1, la cual muestra una diferencia de 0,15 m³/Ton entre indicadores.

Tabla 2.1 Comparación entre KPI agua

Empresa	KPI Agua	Unidad
Proyecto	1,65	m ³ /Ton
Región	1,50	m ³ /Ton

Elaboración propia

Para obtener una visión más clara del indicador, se obtuvieron los registros semanales históricos del KPI de agua en la empresa tal como se muestra en la figura 2.1, la cual muestra un cambio en la media del indicador entre los años 2016 y 2017.

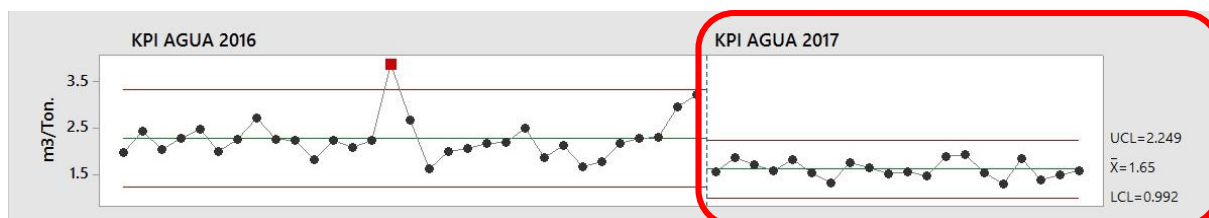


Figura 2.1 Serie de tiempo para el KPI de agua

Elaboración propia

Dicho cambio se explica debido a la implementación previa de proyectos ahorradores, por lo tanto, el periodo de datos que se seleccionó para este análisis

es de enero a mayo de 2017. Los datos se muestran en la tabla 2.2. Con esto se buscó visualizar el comportamiento del indicador a través del tiempo y posibles patrones que hagan referencia a períodos de mayor o menor consumo.

Tabla 2.2 Datos semanales de agua y producción.

Semana	Consumo Agua (m³)	Producción Semanal (Ton.)	KPI Agua
2	821	522,8	1,57
3	1.015	539,7	1,88
4	995	581,0	1,71
5	968	613,0	1,58
6	952	522,6	1,82
7	994	648,3	1,53
8	733	550,2	1,33
9	917	519,9	1,76
10	911	554,6	1,64
11	838	550,9	1,52
12	808	516,1	1,57
13	755	514,1	1,47
14	695	365,5	1,90
15	690	355,5	1,94
16	783	506,1	1,55
17	678	525,7	1,29
18	715	386,8	1,85
19	780	558,2	1,40
20	858	571,7	1,50

Elaboración Propia

En la figura 2.2 se observa como la media de los datos del indicador de agua se encuentran por arriba del consumo esperado en un 10%, además de una diferencia de 0,65 m³/Ton entre el menor consumo registrado la semana 17 (1,29 m³/Ton) y el mayor consumo en la semana 15 (1,94 m³/Ton).

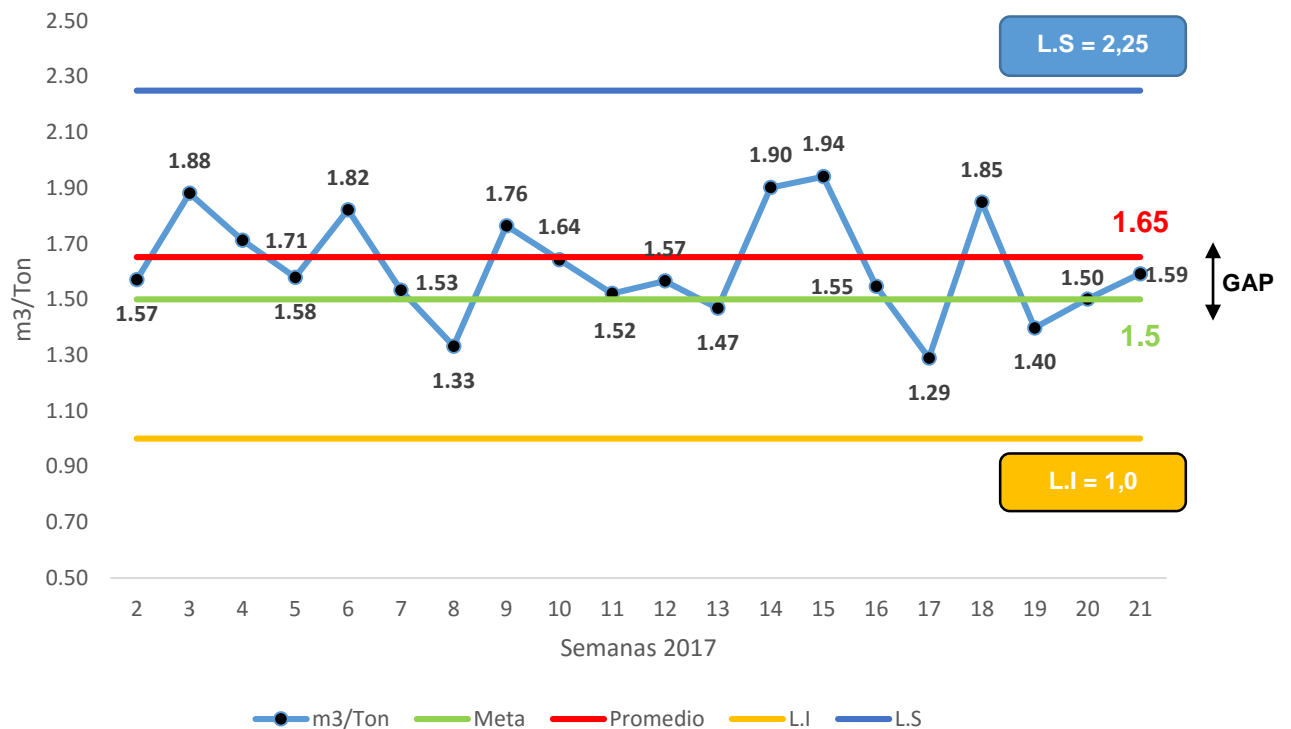


Figura 2.2 Carta de control KPI de agua semanal.
Elaboración propia.

Además, se hace un análisis de capacidad para definir qué tan capaz es el proceso de cumplir las especificaciones, el cual se muestra en la figura 2.3. Con un $C_p = 0,32$ se puede concluir que el proceso no es capaz de cumplir con los límites de especificación un 41% de las veces.

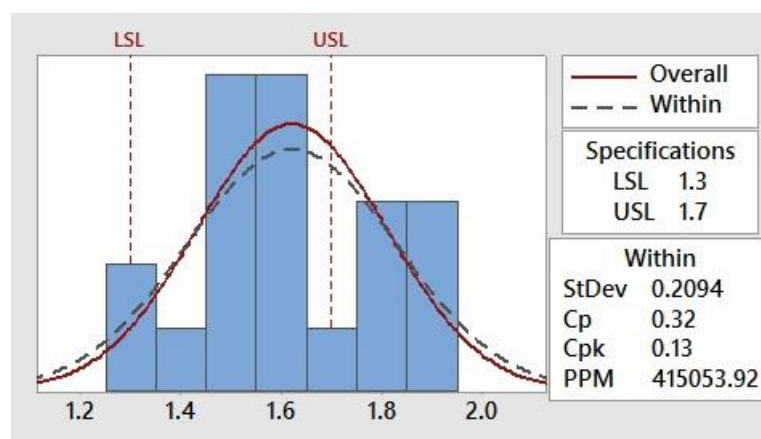


Figura 2.3 Capacidad del proceso de consumo de agua
Elaboración propia

Luego del análisis de los datos históricos de consumo de la empresa, se utilizó la herramienta VOC (voz del cliente), para recolectar las necesidades o quejas sobre el consumo de agua, identificando a los actores y procesos claves. Por medio de

entrevistas a coordinadores de seguridad, jefes técnicos y personal de servicios industriales se obtuvo como resultado la información que se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Matriz VOC

VOC / Queja	CTQ's ⁵ - Requerido	Variables	Objetivo	Límites de especificación
KPI de agua semanal por arriba de especificación	Reducir el consumo de agua por tonelada de producción	Consumo semanal de agua	750 m ³	(680 - 800) m ³
		Volumen de producción semanal	500 Ton	(400 – 550) Ton
Se desconoce el valor en dólares del agua asociada al proceso.	Determinar el valor real del metro cubico de agua	Dólares por metro cúbico	-	-

Elaboración propia

Al recolectar la información o quejas, estas se tradujeron a un CTQ requerido, es decir lo deseable, se obtuvieron las variables a controlar en cada proceso, con sus respectivas metas y límites de especificaciones según las políticas de la empresa.

Con las variables del VOC, se procede a recolectar información sobre estas. Para ello se elabora un plan de recolección de datos en cual se detalla la variable a medir, tipo de dato, donde se recolecta la información y como se mide. La tabla 2.4 muestra la información recolectada.

Tabla 2.4 Plan de recolección de datos

Variable	Tipo de dato	¿Qué es?	¿Cómo se mide?	¿Qué es bueno?	Usos futuro de datos	¿Dónde se registra?	Responsable
m ³	Continua	Volumen de agua consumida en un período de tiempo.	Medidores de agua	Bajo Consumo	Identificación de mayores consumidores de agua	Cuaderno de consumo diario	Michael
Ton	Continua	Toneladas de producción semanal.	Programa de producción semanal	Alta producción	Calcular el indicador semanal de agua	Sistema de producción	Michael
\$	Discreta	Costo por el agua de la red pública, tratamientos químicos y energía por transporte.	Facturas	Bajo precio	Water mapping	Excel	Finanzas

⁵ CTQ: Parámetros críticos de calidad (Critical to quality).

2.2 Medir

La empresa objeto de estudio cuenta con 25 medidores de agua, 16 de ellos son considerados “medidores principales” los cuales totalizan el consumo de un área en específico y los nueve restantes se denominan “medidores secundarios” y sirven de soporte para medir consumos específicos dentro de cada área. Como parte del segundo paso de la metodología DMAIC, es necesario encontrar la relación entre las variables de estudio: consumo de agua y cantidad de producción semanal, y así definir de qué manera influye el uno al otro. Para comprobar si existe relación alguna se realizó una prueba de correlación lineal entre las variables antes mencionadas como se muestra en la figura 2.4.

Hipótesis:

H_0 = El consumo de agua presenta una correlación lineal con la cantidad de tonelaje producido semanalmente igual a cero.

H_1 = El consumo de agua presenta una correlación lineal con la cantidad de tonelaje producido semanalmente diferente de cero.

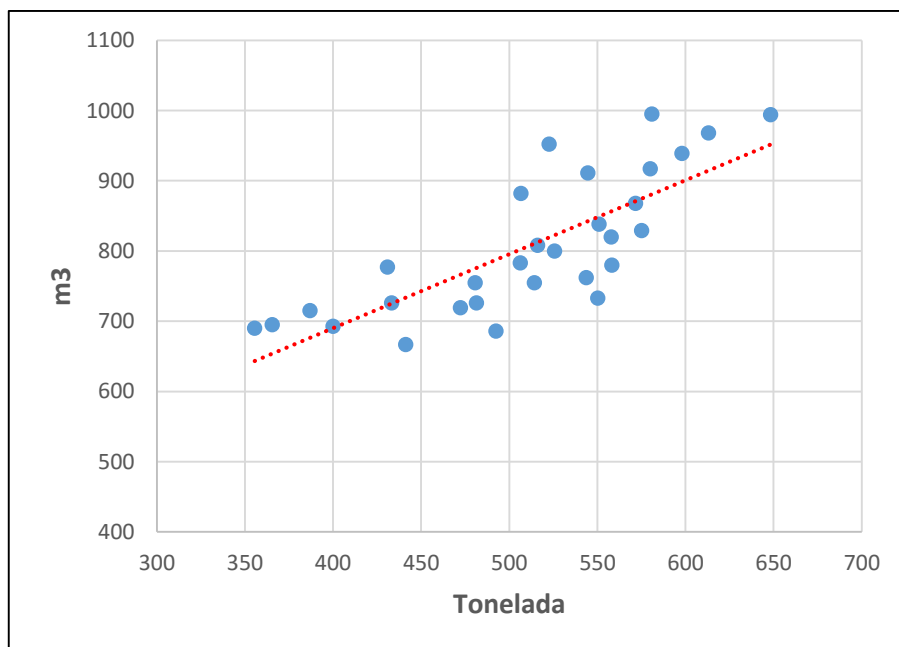


Figura 2.4 Correlación entre variables.

Elaboración propia

Con un valor $p = 0$ y un nivel de confianza del 95%, existe suficiente evidencia estadística para rechazar H_0 . Por lo tanto, podemos concluir que existe correlación

lineal positiva ($r = 0.784$) entre ambas variables, o lo que se interpreta como a mayor volumen de producción, mayor consumo de agua.

Variable 1: Consumo de agua

Luego de encontrar la relación entre variables, el siguiente paso es medir el consumo individual de cada medidor principal con la ayuda del water mapping⁶ de la fábrica elaborado para este proyecto (VER ANEXO 1), para así enfocarse en aquellos que representen el mayor consumo de agua en un mismo período. El diagrama de Pareto que se muestra en la figura 2.5 permite identificar el 20% de los medidores que representan aproximadamente el 80% del consumo de agua en la fábrica.

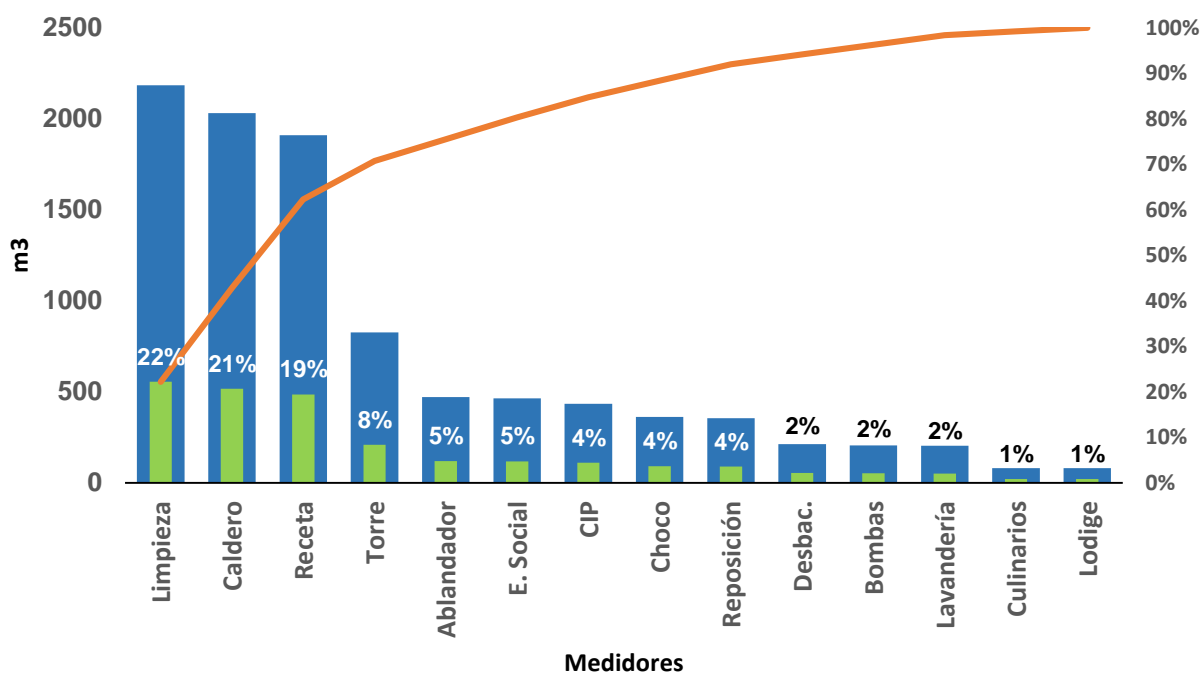


Figura 2.5 Pareto de consumo de agua por área
Elaboración propia

Con base a la figura 2.5, se observa que el área de limpieza, caldero, receta y torre de enfriamiento representan el 70% del consumo general de agua para el período de tiempo antes mencionado. En estas cuatro áreas se realizan los análisis respectivos

⁶ **Water Mapping:** Representación gráfica de todas las fuentes de agua (incluyendo la fuente de la materia prima), los tratamientos, los usuarios y todos los generadores de efluentes de una instalación. (Baud, 2015). "En el presente documento solo se muestra un esquema visual no legible por requerimiento de la empresa"

con el propósito de hallar oportunidades de mejora de gran impacto al indicador de agua.

Con ayuda del equipo de ahorro de la empresa se recolectó la información necesaria (registros diarios de consumo, volúmenes de producción, manuales de equipos, procedimientos de limpieza, generación de vapor) para comparar los consumos esperados versus los consumos reales, los cuales se detallan a continuación.

Para el área de limpieza, el medidor registra el consumo de agua para siete puntos de limpieza, cuatro bombas de vacío (proceso mostaza, mayonesa y salsa de tomate), aduanas de limpieza y bebederos del personal. El consumo esperado de agua se obtiene de los manuales de operación de bombas de vacío, así como de manuales de limpieza de los diferentes procesos en el área y se contrastan con los consumos de agua reales que se obtienen del medidor principal de limpieza.

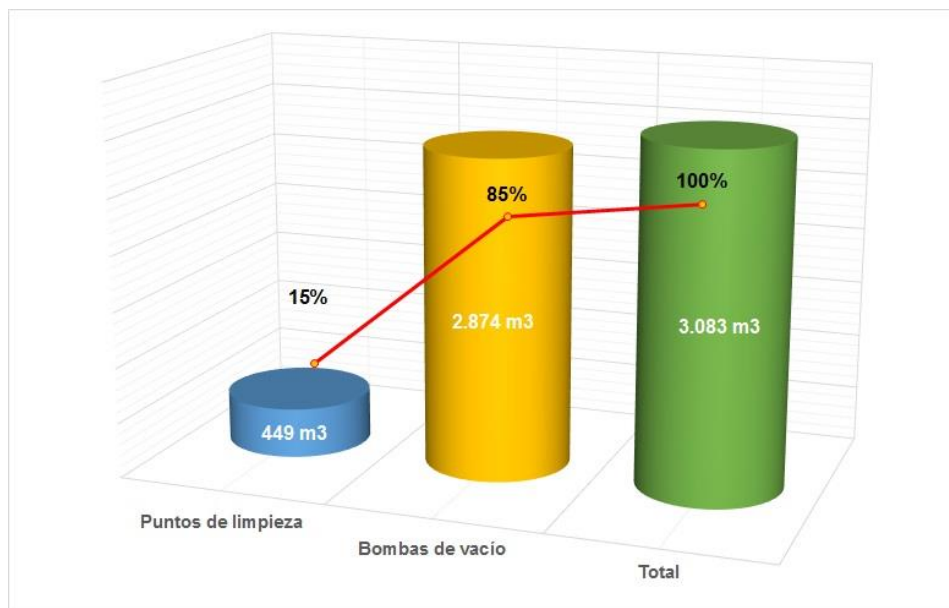


Figura 2.6 Consumo de agua en el área de limpieza
Elaboración propia

La figura 2.6 muestra el consumo de agua en el área de limpieza donde los puntos de limpieza representan un 15% del total del área y el de las bombas de vacío un 85%. El consumo de agua por hora en bombas de vacío especificado en los manuales se compara con el tiempo bueno de producción (TBP) reportado al sistema para los meses de mayo a junio. La tabla 2.5 muestra el consumo de agua calculado para el período antes mencionado.

Tabla 2.5 Tiempo de producción para bombas de vacío.

Recurso	TBP (h)	m ³ /h	Consumo Esperado (m3)
Mostaza	492	1,23	605
Mayonesa	256	1,23	317
S. Tomate	236	1,23	290
TOTAL	984		1.213

Elaboración propia

Además, para probar la relación entre el volumen de producción del área de la empresa denominada salsas frías y el consumo de agua usado en las bombas de vacío que se utiliza para dicha producción, se realizó una prueba de correlación como se muestra en la figura 2.7. Se plantean dos hipótesis: H_0 : Correlación = 0; H_1 : Correlación \neq 0. Con un p-valor igual a cero y $r = 0.798$ se puede concluir que existe una correlación lineal positiva entre las variables, consumo de agua en bombas de vacío y tonelaje de producción efectiva del área de salsas frías.

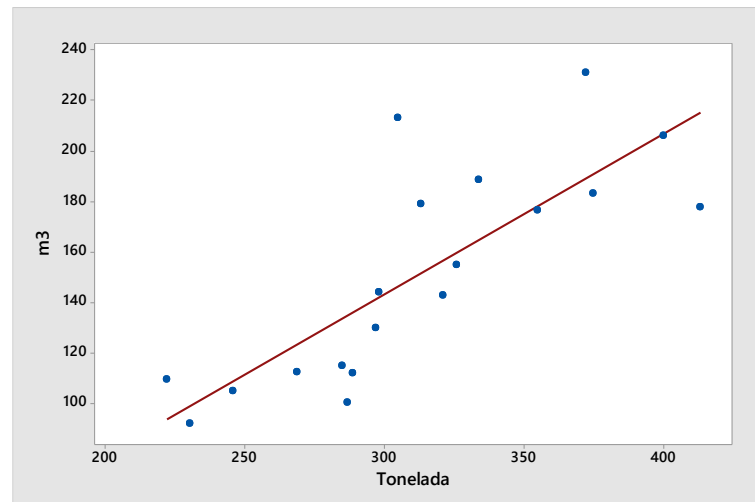


Figura 2.7 Correlación entre m³ y volumen de producción del área

Elaboración propia

La figura 2.8 muestra el consumo de agua en las bombas de vacío un 54% mayor que el consumo esperado en el mismo período. El siguiente paso es analizar las posibles causas de estos consumos anómalos en la fase de análisis.

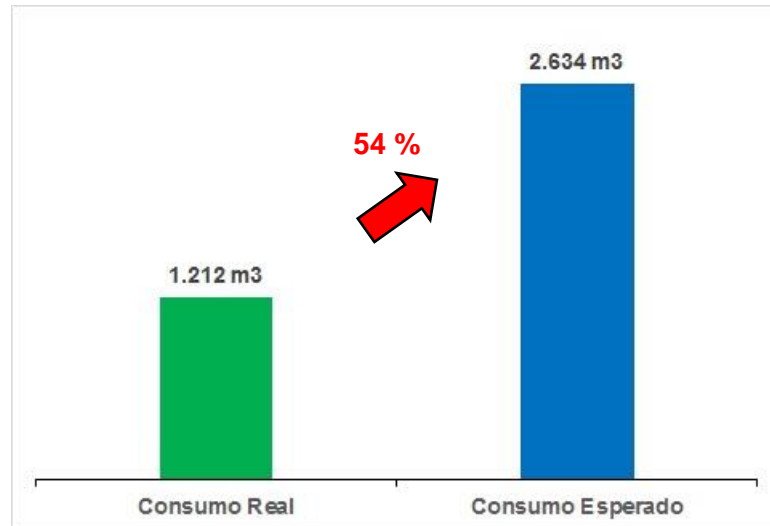


Figura 2.8 Consumo real versus esperado en bombas de vacío
Elaboración propia

Para comparar los consumos del área de caldero se obtienen los datos de vapor de agua generado y el volumen de retorno de condensado semanal y se reemplazan en la ecuación 2.1 para calcular el consumo de agua esperado. El consumo de agua real se obtiene de los registros diarios que lleva el personal de servicios industriales. La tabla 2.6 muestra las cantidades de vapor entregadas al proceso y el total de retorno de condensado en el mismo período.

$$\text{Reposición (m}^3\text{)} = \text{Vapor entregado (m}^3\text{)} - \text{Retorno de condensado (m}^3\text{)} \quad (2.1)$$

Tabla 2.6 Reposición de agua en calderos en m³.

Vapor Entregado (a)	Retorno de condensado (b)	Reposición esperada (a-b)	Reposición real
314	122	192	261
254	197	58	157
310	194	116	154
284	214	70	138
286	205	80	128
257	178	79	119
269	187	82	122
268	203	65	153
275	209	66	132
		Σ 807	Σ 1.364

Elaboración propia

La reposición de agua de los calderos es un 41% mayor al consumo semanal esperado de la cantidad de vapor entregado, tal como lo muestra la figura 2.9.

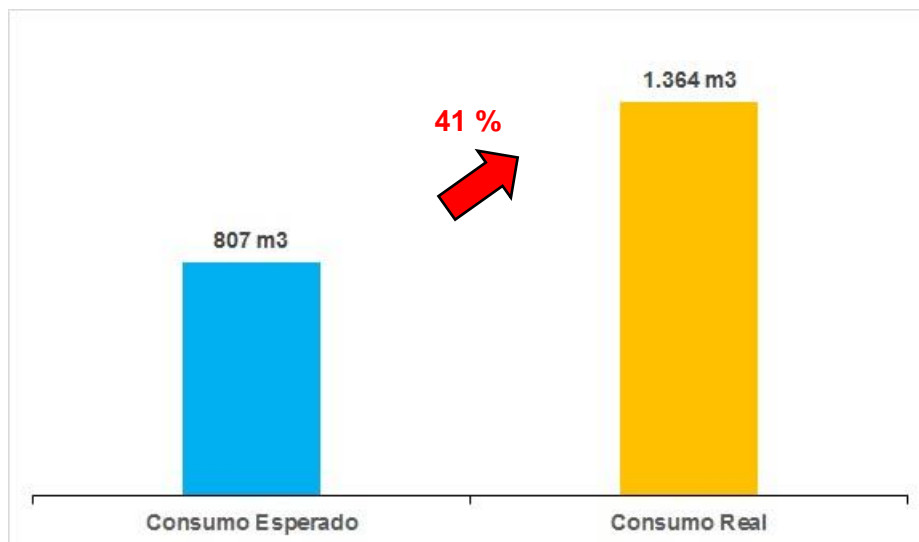


Figura 2.9 Consumo real versus esperado en calderos.

Elaboración propia

Los consumos en el medidor de receta están relacionados directamente con el nivel de producción por medio de la tabla 2.7 debido a que, el agua es una de las materias primas del proceso de elaboración de salsa de tomate, mayonesa y mostaza.

Tabla 2.7 Consumo de agua por receta

Receta	m3/Ton	Agua en receta
Caldo Gallina	0,01	1,2%
Caldo Costilla	0,02	1,6%
Caldo Verduras	0,01	1,4%
Mayonesa	0,18	17,8%
Ketchup	0,42	42,3%
Mostaza	0,72	71,9%
Mayonesa Light	0,54	53,7%
Sazón Aderezo	0,60	59,9%
Salsa BBQ	0,46	46,0%

Fuente: Empresa

Con la información de la tabla 2.7 se puede comparar los volúmenes esperados de consumo de agua para cierta cantidad de producto con lo medido por el medidor general del área.

La figura 2.10 muestra los volúmenes de agua esperados en verde, el cual es un 24% mayor que el consumo real de agua pintado en rojo para un total de producción de 2.370 Ton.

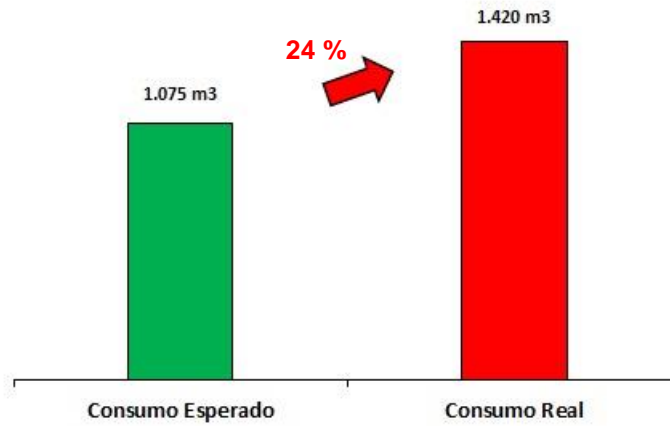


Figura 2.10 Consumo real versus esperado en receta.
Elaboración propia

Por último, se recolectan los consumos de reposición semanales de agua en la torre de enfriamiento. Dado que el circuito de torre es un sistema cerrado, se espera un comportamiento normal para los datos de reposición semanales de agua. La figura 2.11 muestra el test de normalidad que se realizó con el siguiente par de hipótesis: H_0 : Los datos siguen una distribución normal; H_1 : Los datos no siguen una distribución normal. Con un p-valor $> 0,150$ y con un nivel de confianza del 95% se puede concluir que no existe suficiente evidencia estadística para rechazar H_0 , por lo que, podemos concluir que los datos siguen una distribución normal. La carta de control que se muestra en la figura 2.8 muestra un cambio en la media (μ) de 30 m³ a 50 m³ además de un aumento en la variación de los datos de consumo de agua a partir de octubre de 2016.

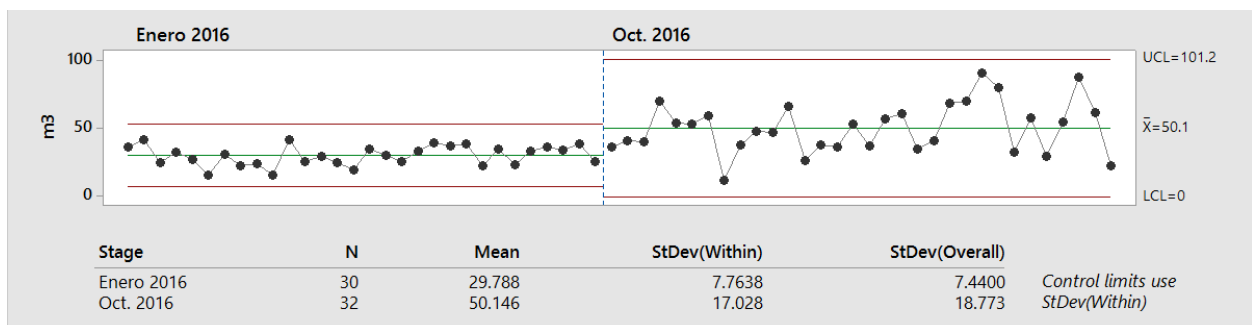


Figura 2.11 Carta de control para reposición de agua en torre.
Elaboración propia

Los datos recolectados en cada área analizada indican que existen consumos mayores a los esperados. La tabla 2.8 muestra un resumen de los problemas encontrados por área de consumo.

Tabla 2.8 Principales problemas por área.

Área	Problema
Limpieza	Las bombas de vacío utilizan un 54% más del consumo esperado de agua.
Caldero	El agua de reposición medido en el área de calderas muestra un 41% más del consumo esperado.
Receta	El consumo de agua en medidor de receta se encuentra 24% por arriba del consumo esperado.
Torre de enfriamiento	La media de reposición en la torre de enfriamiento es 60% mayor al esperado.

Elaboración propia

Variable 2: Producción Semanal

La información del tonelaje semanal se utilizó para calcular el KPI de agua semanal y no como parte de un análisis más profundo debido a que la variabilidad de la demanda no entra en el alcance del proyecto. La figura 2.12 muestra la serie de tiempo de producción semanal y la tabla 2.9 presenta los datos recolectados para el mismo período.

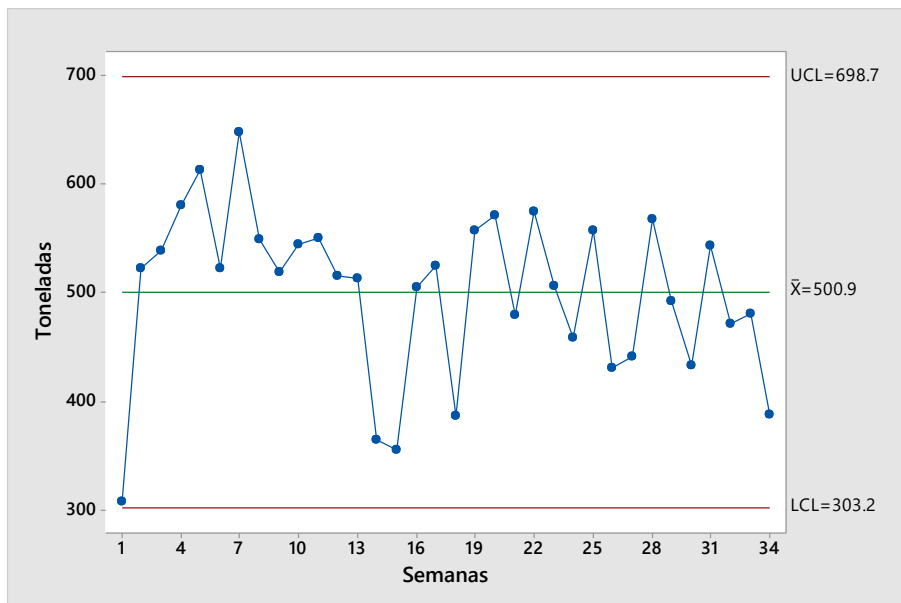


Figura 2.12 Producción semanal. Enero-Julio 2017

Elaboración propia

Tabla 2.9 Producción Semanal 2017

Semana	Ton.	Semana	Ton.
1	308	18	387
2	523	19	558
3	540	20	572
4	581	21	481
5	613	22	575
6	523	23	507
7	648	24	459
8	550	25	558
9	520	26	431
10	545	27	441
11	551	28	568
12	516	29	493
13	514	30	433
14	365	31	544
15	356	32	472
16	506	33	481
17	526	34	389

Variable 3: Costo (\$) por metro cúbico

Por requerimientos de la compañía donde se realizó el proyecto, los valores asociados al costo del agua no pueden ser reproducidos en este documento.

El siguiente paso de la herramienta DMAIC se enfoca en encontrar las posibles causas que ocasionan las variaciones entre el consumo esperado de agua y el real.

2.3 Analizar

En la parte del análisis se utilizó herramientas como lluvia de ideas, diagramas causa y efecto y técnica de cinco ¿por qué?.

Junto con el equipo de ahorro de agua de la fábrica se realizaron reuniones en diferentes horarios para identificar las causas raíces a los problemas encontrados para la variable 1 del paso anterior.

En la tabla 2.10 se muestra el resumen de las principales causas raíces encontradas en cada una de las áreas de análisis. En los anexos 2, 3, 4 y 5 se proporciona los diagramas de causa y efecto, así como la técnica de cinco ¿por qué? Empleadas en la búsqueda de causas raíces para los principales problemas del área de limpieza y caldero.

Tabla 2.10 Causas raíces de los principales problemas

Área	Problema	Causa raíz
Limpieza	Las bombas de vacío utilizan un 54% más del consumo esperado de agua.	Altura de la conexión de descarga en tanque de recirculación se encuentra en bajo nivel.
		Sistema de recirculación manual en bombas de vacío.
Caldero	El agua de reposición medido en el área de calderas muestra un 41% más del consumo esperado.	Químico inyectado al vapor para evitar corrosión no llega a áreas de culinarios.
		Control de presión no especificada para osmosis inversa.
		Vapor inyectado directamente al agua de lavandería.
Receta	El consumo de agua en medidor de receta se encuentra 24% por arriba del consumo esperado.	El punto de limpieza no se encuentra al mismo nivel que las cubas de preparación.
Torre de enfriamiento	La media de reposición en la torre de enfriamiento es 60% mayor al esperado.	Agua usada en secadora industrial no retorna.
		Sello de válvula de purga se encuentra desgastado.

Elaboración propia

Verificación de las causas

Un paso fundamental en el análisis es la verificación de las causas. Es necesario analizar y validar que dichas causas no sean eventos atípicos y que en realidad produzcan variabilidad en el proceso, por lo tanto, se estableció un plan de verificación de causas el cual se muestra en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11 Verificación de causas raíces

Causa raíz	Verificación	Status	19-Jun	20-Jun	21-Jun	22-Jun	23-Jun
1. Altura de la conexión de descarga en tanque de recirculación se encuentra en bajo nivel.	Observación en sitio	directa Verificada					
2. Sistema de recirculación manual en bombas de vacío	Observación en sitio	directa Verificada Figura 2.10					
3. Químico inyectado al vapor para evitar corrosión no llega a áreas de culinarios	Pruebas de TDS	Verificada					
4. Control de presión no especificada para osmosis inversa en caldera	Análisis de consumo	Verificada					
5. Vapor inyectado directamente al agua de lavandería	Observación en sitio	directa Verificada					
6. El punto de limpieza no se encuentra al mismo nivel que las cubas de preparación	Observación en sitio	directa Verificada					
7. Agua usada en secadora industrial no retorna	Observación en sitio	directa Verificada					
8. Sello de válvula de purga se encuentra desgastado	Observación en sitio	directa Verificada					

Elaboración propia



Figura 2.13 Bombas de vacío. Causa Raíz No. 1

Fuente: Empresa



Figura 2.14 Puntos de limpieza. Causa Raíz No. 6

Fuente: Empresa

2.4 Mejorar

El siguiente paso es buscar las posibles soluciones a las causas raíces. Nuevamente, con ayuda del grupo de ahorro de agua y la verificación de causas raíces se identificaron soluciones para resolver cada una de ellas. Cabe recalcar que la experticia por parte del equipo de servicios industriales fue de vital importancia en este paso de la metodología, ya que, al ser dueños de su proceso tienen una visión más amplia de eficiencia en máquinas, generación de vapor y demás componentes mecánicos de la fábrica. Con este claro soporte se estableció las soluciones para cada causa raíz identificada, tal como se muestra en la tabla 2.12.

Para determinar las soluciones a ser implementadas, se realizó una priorización de las mismas. Los criterios que se usaron para la evaluación son los siguientes:

- Impacto al indicador de agua de fábrica
- Costo de la implementación

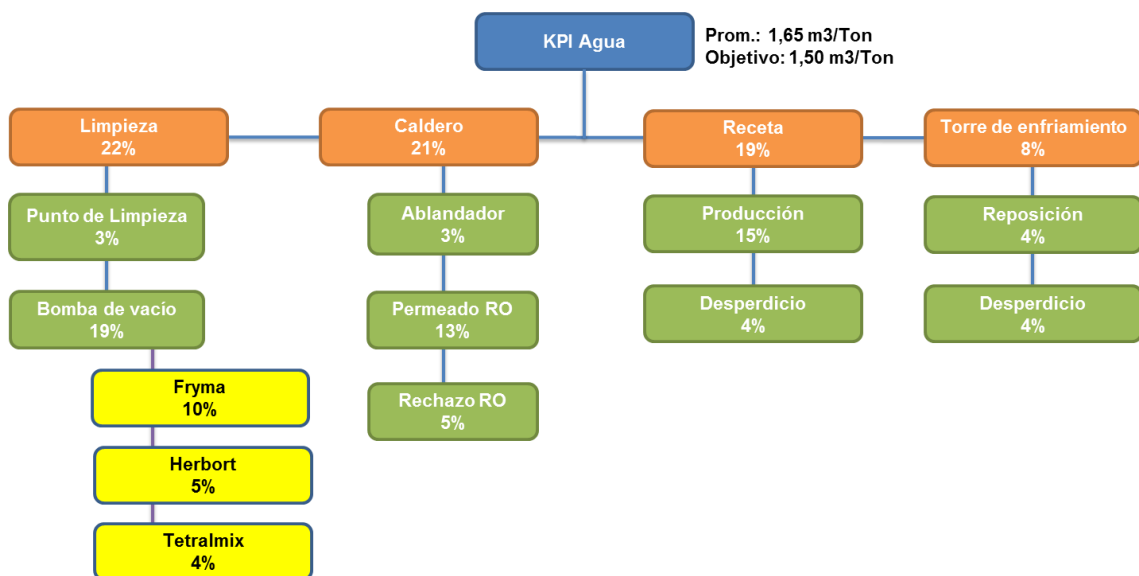


Figura 2.15 Identificación y asignación de proyectos (IPA)

Elaboración equipo de ahorro de agua de la fábrica

Tabla 2.12 Soluciones a causa raíces









Área	Problema	Causa raíz	Posibles soluciones
Limpieza	Las bombas de vacío utilizan un 54% más del consumo esperado de agua.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Altura de la conexión de descarga en tanque de recirculación se encuentra en bajo nivel. 2. Sistema de recirculación manual en bombas de vacío 	<p>Reubicar a un nivel superior la conexión de descarga de agua</p> <p>Recirculación automática de agua en bombas de vacío</p>
Caldero	El agua de reposición medido en el área de calderas muestra un 41% más del consumo esperado.	<ol style="list-style-type: none"> 3. Químico inyectado al vapor para evitar corrosión no llega a áreas de culinarios 4. Control de presión no especificada para osmosis inversa 5. Vapor inyectado directamente al agua de lavandería 	<p>Incrementar la cantidad de químico anticorrosivo en tubería</p> <p>Definir la presión a la cual debe trabajar el proceso de osmosis inversa</p> <p>Sistema de inyección de calor de forma indirecta con la instalación de un intercambiador de calor.</p>
Receta	El consumo de agua en medidor de receta se encuentra 24% por arriba del consumo esperado.	<ol style="list-style-type: none"> 6. El punto de limpieza no se encuentra al mismo nivel que las cubas de preparación 	<p>Reubicar los puntos de limpieza a nivel de las cubas de preparación de mostaza</p>
Torre de enfriamiento	La media de reposición en la torre de enfriamiento es 60% mayor al esperado.	<ol style="list-style-type: none"> 7. Agua usada en secadora industrial no retorna 8. Sello de válvula de purga se encuentra desgastado 	<p>Adaptar la tubería de desagüe de la lavadora al circuito cerrado de torre</p> <p>Cambiar el sello de la válvula de cierre.</p>

Elaboración propia

La figura 2.15 muestra la técnica IPA usada en la empresa para asignar proyectos con base a su impacto. Los porcentajes en cada área representan el impacto al indicador de agua que aporta cada una.

Las tablas 2.13 y 2.14 muestran la calificación asignada a cada solución propuesta por parte del equipo. El impacto al indicador de agua se mide en tres niveles: Bajo=1; Medio=2 y Alto=3. Con ayuda del IPA de agua se asignó el peso relevante para este criterio. Respecto al criterio de costos se utilizó una calificación basada en la experiencia del equipo de servicios industriales y el departamento de finanzas, los cuales calificaron como bajo el rango de (\$0 - \$2.000); medio (\$2.001 - \$4.000) y alto, valores mayores a \$4.000.

Tabla 2.13 Evaluación por impacto al indicador de agua de fábrica

IMPACTO AL KPI DE AGUA					
Soluciones	Limpieza 22%	Caldera 21%	Receta 19%	Torre 8%	Total
1	Reubicar a un nivel superior la conexión de descarga de agua	3			 66%
2	Recirculación automática de agua en bombas de vacío	3		2	 82%
3	Incrementar la cantidad de químico anticorrosivo en tubería		2		 42%
4	Definir la presión a la cual debe trabajar el proceso de osmosis inversa		1		 21%
5	Sistema de inyección de calor de forma indirecta con la instalación de un intercambiador de calor.		2		 42%
6	Reubicar los puntos de limpieza a nivel de las cubas de preparación de mostaza			2	 38%
7	Adaptar la tubería de desagüe de la lavadora al circuito cerrado de torre			2	 16%
8	Cambiar el sello de la válvula de cierre.			1	 8%

Elaboración propia

La ecuación 2.2 muestra la forma de cálculo del impacto al indicador de agua. El porcentaje de cada área se multiplica por el peso asignado (bajo, medio, alto) por el equipo. El color verde representa las soluciones con mayor impacto, el anaranjado las de mediano impacto y el rojo las de bajo impacto.

$$Total = \% \text{ \u00e1rea} * \text{Peso asignado} \quad (2.2)$$

Tabla 2.14 Evaluaci\u00f3n por costos de implementaci\u00f3n

COSTO					
Soluciones		Bajo	Medio	Alto	Total
1	Reubicar a un nivel superior la conexi\u00f3n de descarga de agua	1			 1
2	Recirculaci\u00f3n autom\u00e1tica de agua en bombas de vac\u00edo	1			 1
3	Incrementar la cantidad de qu\u00edmico anticorrosivo en tuber\u00eda			1	 3
4	Definir la presi\u00f3n a la cual debe trabajar el proceso de osmosis inversa	1			 1
5	Sistema de inyecci\u00f3n de calor de forma indirecta con la instalaci\u00f3n de un intercambiador de calor.			1	 3
6	Reubicar los puntos de limpieza a nivel de las cubas de preparaci\u00f3n de mostaza			1	 3
7	Adaptar la tuber\u00eda de desague de la lavadora al circuito cerrado de torre			1	 3
8	Cambiar el sello de la v\u00e1lvula de cierre.	1			 1

Elaboraci\u00f3n propia

En la figura 2.16 se muestra la matriz de priorizaci\u00f3n con base a la evaluaci\u00f3n de las tablas 2.13 y 2.14. Los recuadros de color verde representan las soluciones que se van a elegir para su implementaci\u00f3n y las de color azul las que se implementaran en proyectos futuros.

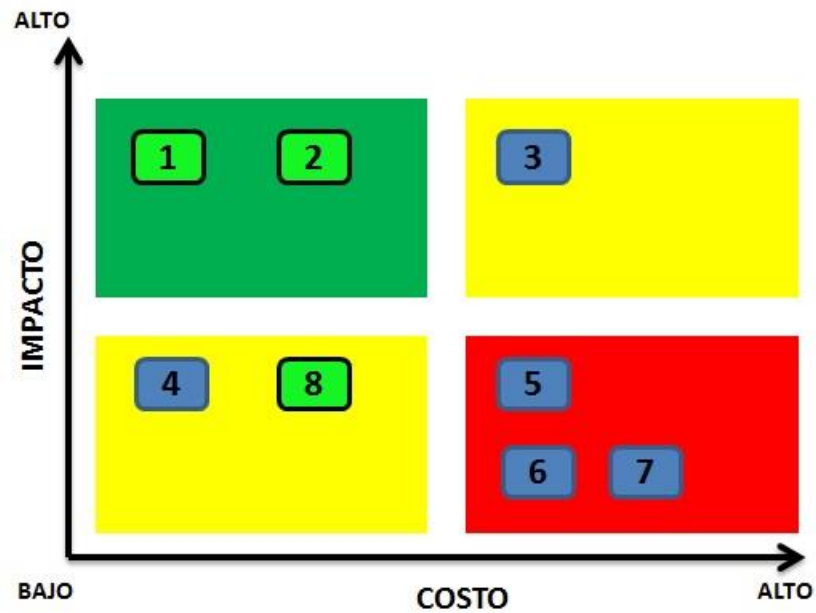


Figura 2.16 Matriz de priorización de soluciones
Elaboración propia

2.4.1 Sistema actual en bombas de vacío para preparación de mostaza

Según el manual de diseño de bombas de vacío (Pompetravaini, s.f):

“En este diseño, el líquido de servicio se toma directamente de la red de agua principal y se suministra a la bomba. La descarga de líquido se separa del gas y se desperdicia a un drenaje. No se produce recirculación ni recuperación. Normalmente, una válvula solenoide automática asegura el flujo del líquido de servicio junto con el funcionamiento del motor de la bomba, es decir, cuando el motor deja de funcionar, la válvula se cierra para evitar que la envoltura llene con líquido de sellado”.

La figura 2.17 muestra el esquema del circuito de bomba de vacío actual de la empresa en preparación de mostaza.

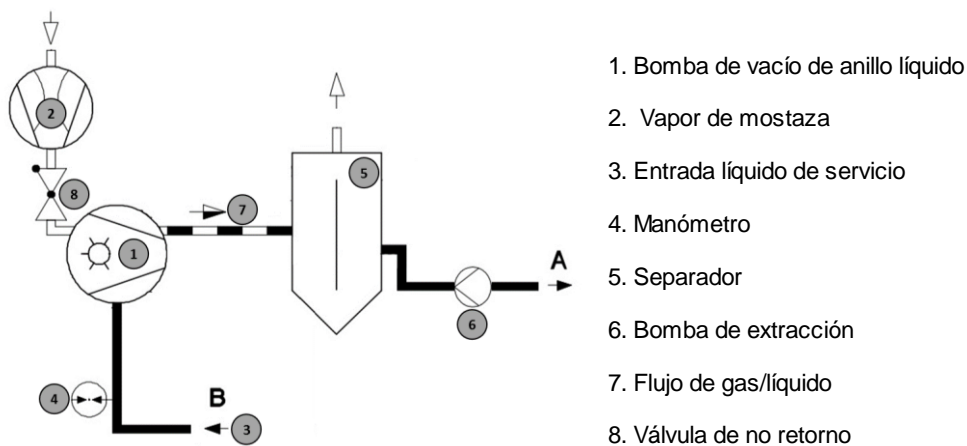


Figura 2.17 Sistema actual de bombas de vacío
 Fuente: (Sterling SIHI, s.f)

Para simular el proceso actual de reposición de agua en bombas de vacío de preparación de mostazas se requiere calcular el caudal (m^3/h) de consumo. Se recolectaron 20 datos (ver tabla 2.15) del tiempo que tarda en llenarse un volumen de 20 litros en el tanque separador a los que se les realizó una prueba de normalidad. Se plantean dos hipótesis: H_0 : Los datos del tiempo de llenado siguen una distribución normal; H_1 : Los datos del tiempo de llenado no siguen una distribución normal. La figura 2.18 muestra la línea de normalidad que siguen los datos de tiempo de llenado.

Tabla 2.15 Tiempos de llenado

Obs.	Tiempo Llenado (sec)	Obs.	Tiempo Llenado (sec)
1	69	11	67
2	52	12	50
3	55	13	57
4	64	14	62
5	62	15	64
6	71	16	64
7	56	17	52
8	59	18	57
9	69	19	59
10	67	20	58

Elaboración propia

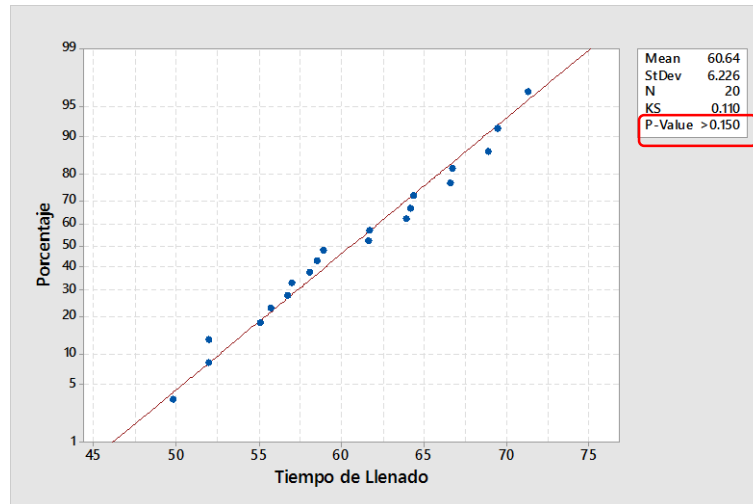


Figura 2.18 Prueba de normalidad para tiempos de llenado
Elaboración propia

En la figura 2.18, se observa un p-valor $> 0,150$. Con un nivel de confianza del 95% se puede concluir que no existe suficiente evidencia estadística para rechazar H_0 , por lo que, podemos concluir que el tiempo de llenado sigue una distribución normal con media ($\mu = 60,64$) y desviación ($\sigma = 6$) segundos por cada 20 litros de agua. Por propiedades de la distribución normal, al dividir datos que provengan de dicha de distribución por una constante, los datos resultantes seguirán comportándose de forma normal, por lo tanto, para conocer el tiempo que le toma a la bomba consumir un litro de agua se divide los datos de tiempo de llenado para 20, obteniendo una distribución normal $N(3,2 ; 0,3)$ sec/ltr.

2.4.2 Recirculación parcial de agua en bombas de vacío para preparación de mostaza

Durante el funcionamiento, la bomba de vacío expulsa, por la brida de impulsión, el gas aspirado y parte del líquido de servicio existente en su interior, el cual debemos reponer continuamente. La mezcla aire-líquido llega a un depósito cúbico donde se produce la separación, el gas sale por el orificio superior del depósito, mientras que el líquido de servicio se sitúa en el interior de este depósito para ser enviado nuevamente a la bomba de vacío.

Durante el ciclo de aspiración y compresión, la bomba de vacío cede todo el trabajo producido bajo la forma de calor al líquido de servicio. El funcionamiento en CIRCUITO PARCIAL necesita una aportación del exterior de líquido de servicio fresco de la misma naturaleza que el utilizado, para que la mezcla del líquido fresco exterior con el del interior, mantenga la temperatura en un rango constante

del líquido de servicio en la entrada de la bomba de vacío. El exceso de líquido aportado se perderá por la válvula de nivel colocada en el depósito.

Este funcionamiento es, en algunos casos ventajoso cuando las características de caudal y vacío lo requieren (ej.: bajo vacío o funcionamiento intermitente) o el líquido de servicio no está contaminado y no crea problemas su eliminación.

Múltiples accesorios están disponibles para satisfacer las exigencias de instalación, de proceso y de mantenimiento, la figura 2.19 muestra los accesorios necesarios en color verde que se requieren instalar al sistema actual para la recirculación parcial.

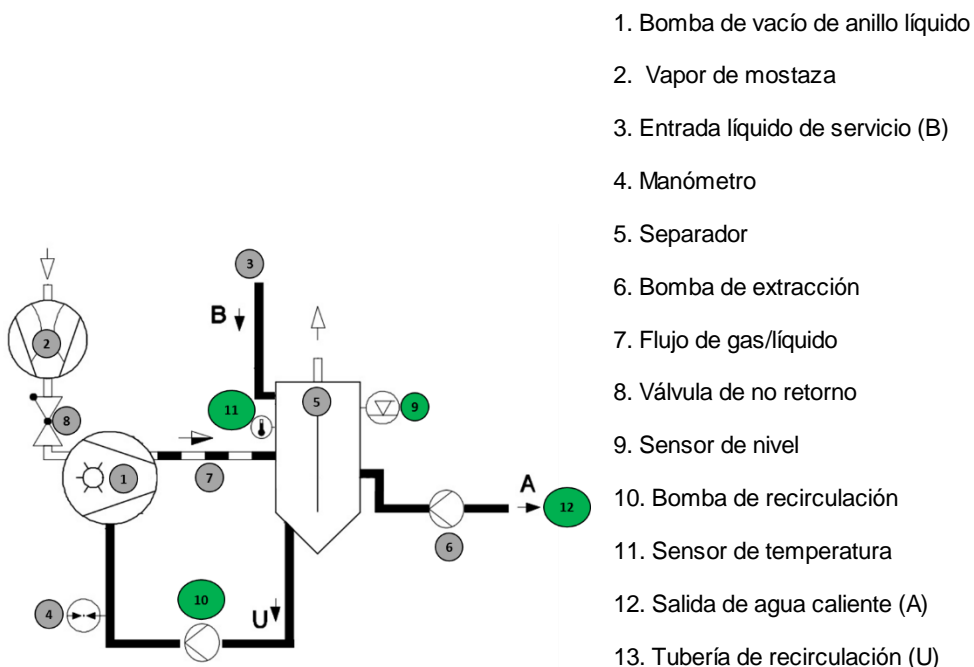


Figura 2.19 Propuesta de mejora para recirculación en bombas de vacío

Fuente: (Sterling SIHI, s.f)

Debido al tiempo limitado en la duración de este proyecto es necesita simular el proceso de recirculación propuesto para estimar el ahorro en consumo de agua, por lo cual es necesario calcular los parámetros del modelo. El tiempo entre reposiciones del sistema de recirculación depende de tres variables de diseño especificadas por el fabricante las cuales se muestran en la tabla 2.16.

Tabla 2.16 Variables del modelo de recirculación

Unidades	Variables
Litros	Volumen de recirculación en el sistema
Joule	Calor transferido por vapor de mostaza y energía de bomba
°C	Temperatura inicial del líquido de servicio

Elaboración propia

2.4.2.1 Volumen de recirculación y transferencia de calor

El calor absorbido Q_T durante el funcionamiento de una bomba de vacío tipo anillo líquido es el mostrado en la ecuación 2.3.

$$Q_T \left(\frac{kJ}{h} \right) = Q_C + Q_K + Q_R \quad (2.3)$$

Q_C = $0,9 \cdot P \cdot 3.600$ = Calor de compresión isotérmica

Q_K = $m_v \cdot r$ = Calor de condensación

Q_R = $m_g \cdot c_p \cdot \Delta T_a$ = Calor de refrigeración

m_v = masa que se condensa del vapor aspirado en kg/h

m_g = masa de gas aspirado en kg/h

P = potencia absorbida en el punto de funcionamiento en Kw

C_p = Calor específico del gas en kJ/kg

r = Calor de vaporización en kJ/kg

ΔT_a = Diferencia estimada entre la temperatura K del gas aspirado T_G y la temperatura del líquido de servicio a la salida ($T_2 + \Delta T$)

K = Temperatura en grados kelvin

Una vez determinado el valor de Q_T en las condiciones de funcionamiento, las variaciones de temperatura ΔT del líquido de servicio entre la entrada y la salida se calcula con la ecuación 2.4:

$$\Delta T = \frac{Q_T}{Q_A \cdot \rho \cdot C_p} \quad (2.4)$$

Donde:

Q_T = Calor absorbido en kJ/h calculado anteriormente.

Q_A = Caudal necesario del líquido de servicio en las condiciones de

funcionamiento en m³/h.

ρ = Densidad del líquido de servicio en kg/m³ (agua=1.000)

C_p = Calor específico del líquido de servicio en kJ/kg x K

Dada la dificultad de estimar los parámetros teóricos, se utilizó el sistema manual existente de recirculación para estimar la tasa de calor que se transfiere al volumen de agua. Se necesitan 30 datos para tener una buena estimación sobre si los datos se comportan de forma normal, pero dada las condiciones en las que se adquieren (disponibilidad de operarios, paros de producción) no es posible obtener esa cantidad. Por lo tanto, se obtienen 15 datos los cuales se muestran en la tabla 2.17.

Tabla 2.17 Tasa de transferencia de calor

#	H m	Volumen Ltr	Temperatura (°C)			Tiempo min	Q kJ	Q̇ kJ/min
			To	Tf	∇T			
1	0,20	26	26,6	35	8,4	9,4	906	96,0
2	0,20	26	27,9	35	7,1	7,5	766	102,5
3	0,20	26	28,8	35	6,2	6,2	674	108,7
4	0,25	32	25,4	35	9,6	9,5	1294	136,3
5	0,25	32	25,9	35	9,1	9,2	1227	132,8
6	0,25	32	27,9	35	7,1	9,6	954	99,8
7	0,30	39	27,0	35	8,0	11,3	1287	114,0
8	0,30	39	28,3	35	6,7	7,7	1084	140,5
9	0,30	39	30,0	35	5,0	7,9	816	103,1
10	0,35	45	26,3	35	8,7	14,5	1641	113,4
11	0,35	45	27,4	35	7,6	12,2	1434	118,0
12	0,35	45	28,2	35	6,8	12,8	1289	100,4
13	0,40	52	26,7	35	8,3	14,8	1788	120,5
14	0,40	52	27,8	35	7,2	13,1	1553	118,2
15	0,40	52	29,6	35	5,4	12,8	1160	90,9

Elaboración propia

La primera columna indica la altura del volumen de recirculación en el tanque separador, la segunda muestra los litros asociados a la altura (H). La tercera contiene la temperatura inicial del líquido de servicio y la final (35°C). También se muestra el periodo de tiempo en el cual el volumen de recirculación llega a la temperatura final y la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura del líquido de recirculación se calcula por medio de la ecuación 2.4. La última columna muestra la tasa de transferencia de calor para cada dato recolectado. La figura 2.20 muestra la prueba de normalidad realizada a los datos.

$$\text{Calor: } Q = mC(T_f - T_o) \text{ kJ} \quad (2.4)$$

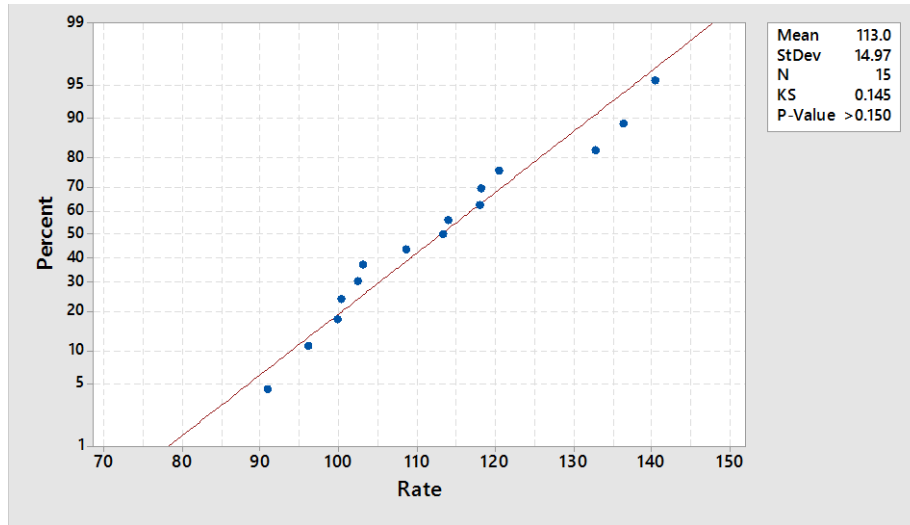


Figura 2.20 Prueba de normalidad para tasa de transferencia de calor
Elaboración propia

Con media ($\mu = 113 \text{ kJ/min}$) y varianza ($\sigma = 15 \text{ kJ/min}$) además de un p-value $> 0,15$ se puede asumir que los datos siguen una distribución normal. Con un 95% de nivel de confianza el I.C. (104,7 – 121,3) kJ/min.

2.4.2.2 Temperatura de líquido de servicio

La tabla 2.18 muestra los datos recolectados en cinco días diferentes para la temperatura inicial del líquido de servicio. También, la figura 2.21 muestra la prueba de normalidad para la temperatura inicial.

Tabla 2.18 Datos de temperatura inicial de líquido de servicio

Obs.	T°C Inicio Agua	Obs.	T°C Inicio Agua
1	27,0	12	28,8
2	29,0	13	30,3
3	28,6	14	30,0
4	26,6	15	26,7
5	28,4	16	27,8
6	30,7	17	27,0
7	30,2	18	30,9
8	30,6	19	26,1
9	26,3	20	27,7
10	30,1	21	27,9
11	28,2		

Elaboración propia

La figura 2.21 muestra la prueba de normalidad realizada a los datos de temperatura de inicio del líquido de servicio. Con un valor p-valor igual a 0,123 y un nivel de confianza del 95%, no existe suficiente evidencia estadística para rechazar H_0 . Por lo tanto, los datos se comporta de forma normal con $N(27,8 ; 1,7)^\circ\text{C}$.

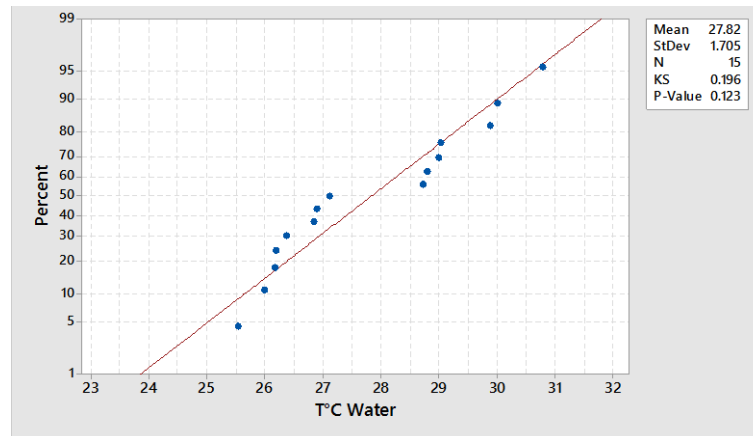


Figura 2.21 Prueba de normalidad para temperatura de líquido de servicio

Elaboración propia

2.5 Control

Esta fase tiene como objetivo, que las mejoras realizadas perduren a través del tiempo, para esto es necesario implementar controles de operación al proceso de mejora. Para el sistema de recirculación de agua en bombas de vacío se establecieron dos controles.

2.5.1 Check List de Arranque

CHECK LIST DE ARRANQUE						
SEMANA:						
Parámetro	Estándar	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES
T°C	(25 - 29)°C					
Nivel de agua	40 cm					
Presión en bomba	500 mBa					
Velocidad	3500 rpm					

Figura 2.22 Check list de arranque

Elaboración propia

El Check list de arranque que se observa en la figura 2.22 permitirá mantener bajo estándares los parámetros claves del proceso, los cuales son: altura del volumen de recirculación, temperatura inicial del líquido de servicio, presión en bombas de vacío y velocidad de bomba.

2.5.2 Carta de control para reposición de agua

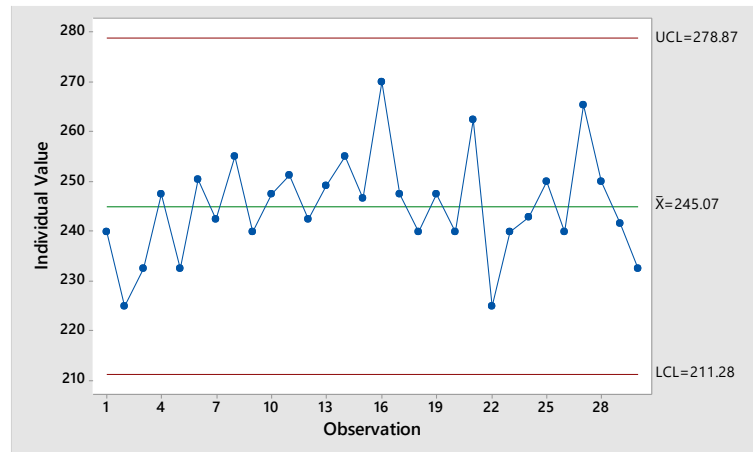


Figura 2.23 Carta de control para reposición de agua por hora
Elaboración propia

Una carta de control como la que se indica en la figura 2.23 se recomienda utilizar para mantener el proceso de reposición de agua dentro de control estadístico. La implantación de la misma para el proceso de recirculación ayudará a detectar cualquier cambio en la media del proceso o puntos fuera de los límites de control debido a variaciones en los parámetros de control establecidos anteriormente.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

3.1 Simulación del proceso actual

Se realizó la simulación del proceso actual de bombas de vacío en preparación de mostaza para estimar el consumo de agua en un turno de ocho horas. Usando el software de simulación PROMODEL se realizaron 30 réplicas, con un tiempo de procesamiento normal $N(3 ; 0,3)$ sec/ltr, obteniendo los siguientes resultados mostrados en la tabla 3.1. La figura 3.1 muestra el modelo de simulación del proceso actual.

Tabla 3.1 Resultados de simulación. Estado Actual

Litros		
9.494	9.502	9.478
9.509	9.508	9.485
9.507	9.482	9.507
9.511	9.482	9.475
9.485	9.505	9.499
9.474	9.506	9.467
9.505	9.492	9.504
9.501	9.513	9.481
9.489	9.485	9.500
9.493	9.514	9.491

Elaboración propia

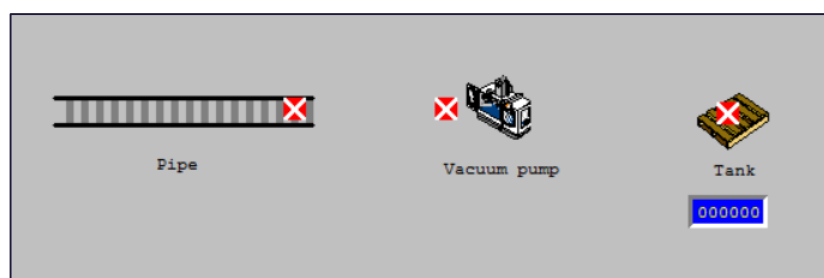


Figura 3.1 Simulación del proceso actual en bombas de vacío

Elaboración propia

Para comprobar la normalidad de los datos que resultan de la simulación se plantea una prueba de hipótesis: H_0 : Los datos de reposición de agua siguen una distribución normal; H_1 : Los datos de reposición de agua no siguen una distribución normal. La figura 3.2 muestra la línea de normalidad que siguen los datos.

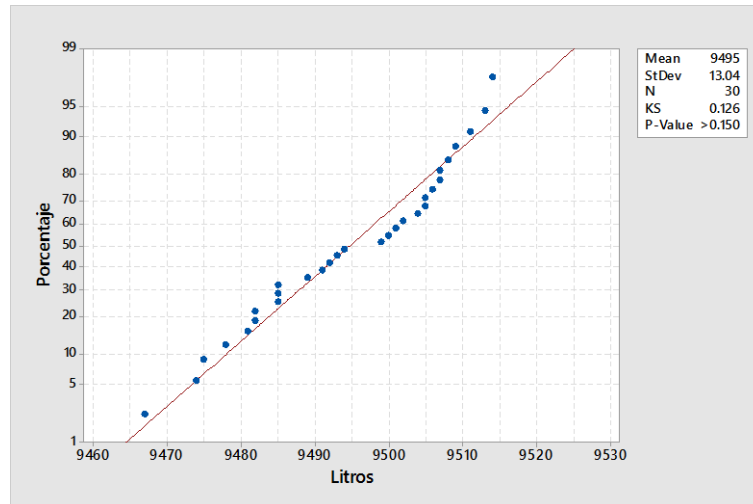


Figura 3.2 Prueba de normalidad para resultados de simulación actual
Elaboración propia

La figura 3.2 muestra un p-valor $> 0,150$ con el cual se puede concluir que no existe suficiente evidencia estadística para rechazar H_0 . Con una media de consumo de ($\mu = 9495$ Ltr/Turno) y una variación ($\sigma = 13$ Ltr/Turno), con un 95% de nivel de confianza se puede concluir que la media del proceso se encuentra entre *I.C.* (9489 – 9500) Ltr/Turno.

3.2 Simulación del proceso de mejora

Con el software LabView⁷ se simuló el proceso de mejora como se muestra en la figura 3.3 y se presentan los resultados a continuación. La tabla 3.2 muestra los parámetros del modelo.

Tabla 3.2 Parámetros de simulación del proceso de mejora

Parámetro	Distribución	Unidad
Tiempo de simulación	8	horas
Temperatura	N(27,8 ; 1,7)	°C
Tasa de Transferencia	N(113 ; 15)	kJ/min
Presión	500	mBa
Velocidad de reposición	30	Ltr/min
Velocidad de extracción	40	Ltr/min

Elaboración propia

⁷ **LabVIEW** es un software de ingeniería de sistemas para procesos que requiere pruebas, medidas y control con acceso rápido a hardware e información de datos. (Nationals Instruments, s.f)

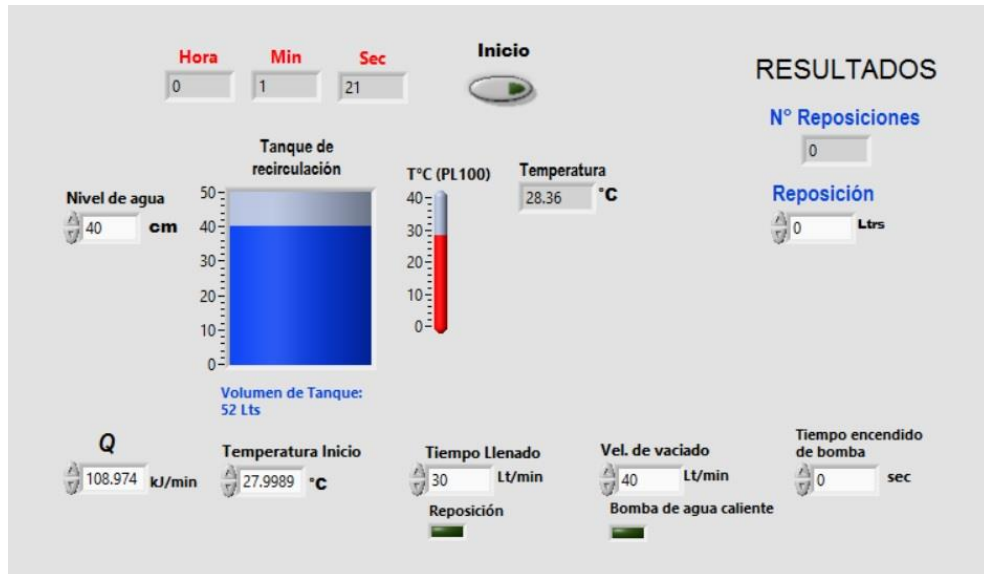


Figura 3.3 Simulación del proceso de mejora usando LabView
Elaboración propia

El proceso se simuló para un turno de ocho horas con un número de réplicas igual a 30, de las cuales se obtienen los datos mostrados en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Resultados de simulación. Mejora propuesta

Litros		
1.920	2.010	2.100
1.800	1.939	1.800
1.860	1.993	1.920
1.980	2.040	1.943
1.860	1.973	2.000
2.003	2.160	1.920
1.940	1.980	2.123
2.040	1.920	2.000
1.920	1.980	1.933
1.980	1.920	1.860

Elaboración propia

Hipótesis:

H_0 = La reposiciones de agua en el sistema de recirculación sigue una distribución normal.

H_1 = La reposiciones de agua en el sistema de recirculación no sigue una distribución normal.

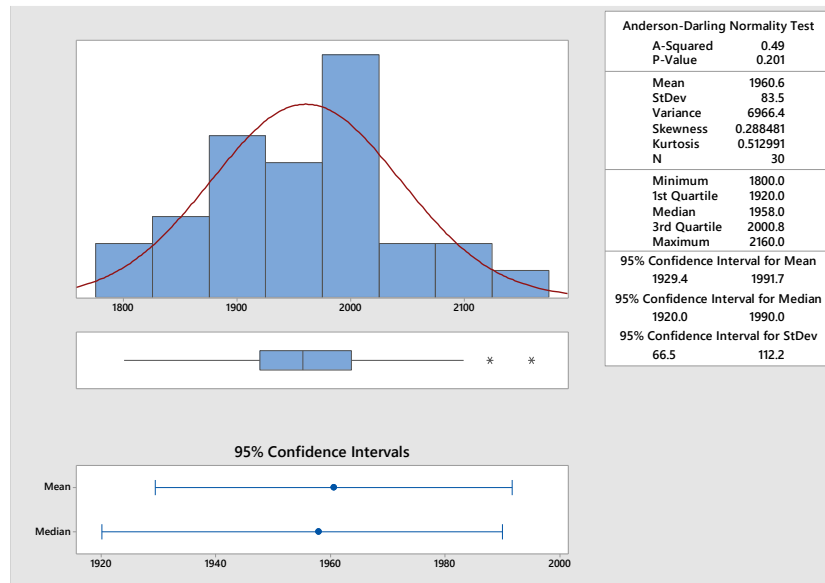


Figura 3.4 Prueba de normalidad para resultados de simulación
Elaboración propia

La figura 3.14 muestra el histograma de normalidad para los datos de reposición de agua. Además, presenta un p-valor = 0,201 de lo cual podemos concluir que no existe suficiente evidencia estadística para rechazar H_0 . Los datos de comportan de forma normal con media ($\mu = 1.961$ Ltr/Turno) y una varianza ($\sigma = 83,5$ Ltr/Turno), con un 95% de nivel de confianza se puede concluir que la media del proceso se encuentra entre *I.C.* (1.929 – 1.991) Ltr/Turno.

3.3 Comparación de resultados

Para comparar si la simulación de la propuesta de mejora muestra un ahorro significativo en el consumo de agua, se comparó con los resultados de la simulación del estado actual. Se empleó una prueba T-pareada para diferencia de medias entre los consumos del sistema de recirculación propuestos y los consumos actuales para comprobar si existe diferencia estadística significativa.

Hipótesis:

$H_0 =$ La medias son iguales .

$H_1 =$ Las medias son diferentes.

La figura 3.5 y 3.6 muestra los resultados obtenidos del software Minitab al comparar las dos muestras. En la primera observamos la media de los datos y el p-valor y la siguiente muestra de forma visual la diferencia de medias.

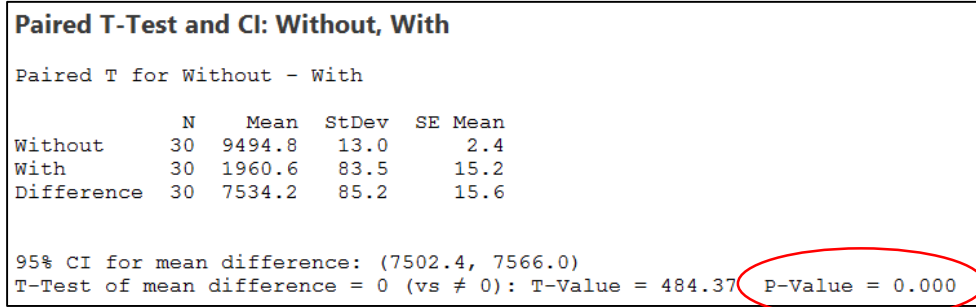


Figura 3.5 Prueba T-pareada para diferencia de medias

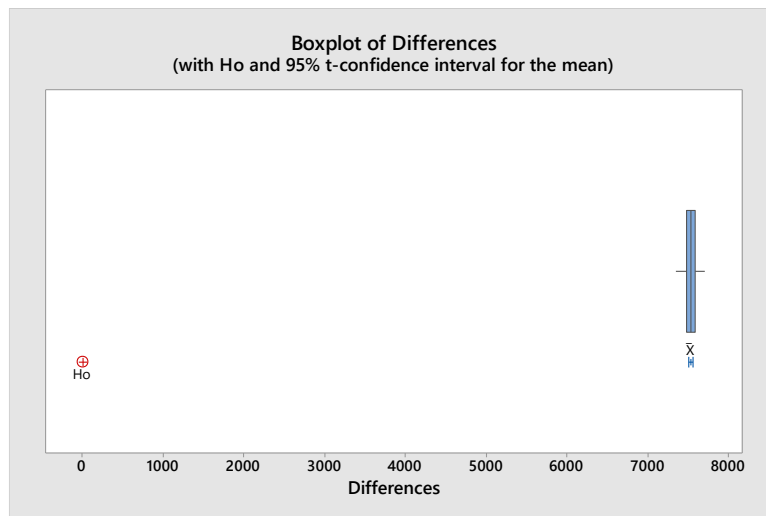


Figura 3.6 Diagrama de cajas para diferencia de medias
Elaboración propia

Con p-valor de cero obtenido de la figura 3.5 y un nivel de confianza del 95%, existe suficiente evidencia estadística para rechazar H_0 . Es decir, las medias de ambas simulaciones son diferentes.

La figura 3.7 muestra la comparación entre las medias de los datos de ambos procesos (con y sin recirculación), mostrando un ahorro del 79% del consumo de agua en las bombas de vacío para un turno de ocho horas.

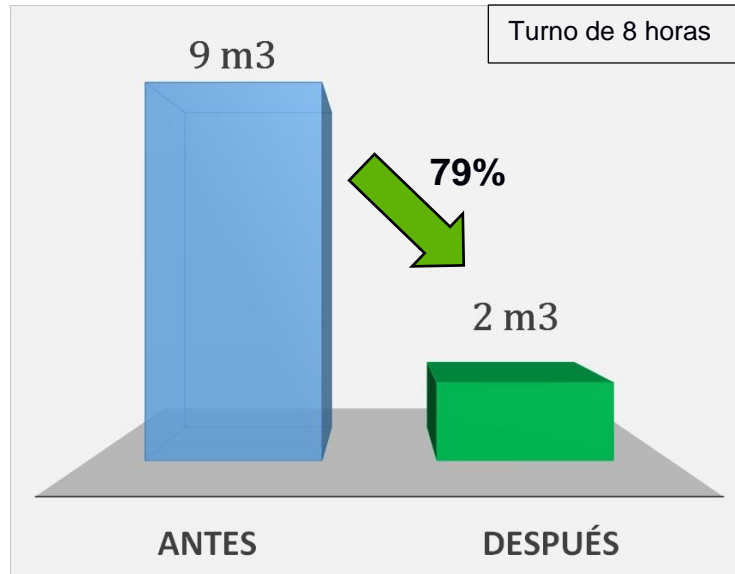


Figura 3.7 Resultado de simulación con y sin recirculación
Elaboración propia

3.4 Evaluación financiera

La evaluación financiera es indispensable al momento de desarrollar un nuevo proyecto, dado que, en la mayoría de ocasiones termina siendo el factor principal en la decisión final. La tabla 3.4 muestra el uso estimado en horas del sistema de recirculación y el costo del agua por m³ y energía por kWh.

Tabla 3.4 Horas de uso y costos asociados

TPB/Mes	225 hr	PRECIO/m³ Agua	\$ 1,46
TPB/Año	2.700 hr	PRECIO/Kwh	\$ 0,08

Fuente: Empresa

La tabla 3.5 muestra los costos de la inversión inicial del proyecto, así como también los costos fijos y variables en los que se incurre de llegar a desarrollar el mismo.

Tabla 3.5 Inversión inicial, costos fijos y variables

Inversión Inicial			
Equipos	Cant.	\$/Unit.	Total
Bomba Pedrollo 110 v	1	\$ 70,0	\$ 70,0
Sensor de temperatura	1	\$ 283,0	\$ 283,0
Sonda sumergible para sensor	1	\$ 20,0	\$ 20,0
Puntos de soldadura	4	\$ 25,0	\$ 100,0
Tablero de control 110 v	1	\$ 650,0	\$ 650,0
Tuberia de acero inoxidable 1/2"	1	\$ 80,0	\$ 80,0
MOD			
Contratista		\$ 400,0	\$ 400,0
		TOTAL	\$ 1.603,0
Costo Fijo			
Mantenimiento Anual			
Bomba Pedrollo 110 v			\$ 10,00
Sensor de temperatura (PT100)			\$ 25,00
Sonda sumergible para sensor			\$ -
Tablero de control 110 v			\$ 40,00
		TOTAL CF	\$ 75,00
Costo Variable			
Energía	kw		
Bomba	\$ 0,37		
Tablero	\$ 0,50		
		TOTAL CV	\$ 0,87

Elaboración propia

La tabla 3.6 muestra el flujo neto del proyecto para un período de tres años. En la tabla 3.7 se muestran los indicadores financieros, un VAN de \$4.661,4, TIR de 208%, y un PAYBACK de seis meses, lo cual indica que es un proyecto rentable.

Tabla 3.6 Flujo neto de efectivo

Años	0	1	2	3
Demanda (Horas)		2.700	2.700	2.700
Ahorro (+)		\$ 3.712,28	\$ 3.712,28	\$ 3.712,28
C.F. (-)		\$ 75,00	\$ 75,00	\$ 75,00
C.V. (-)		\$ 187,92	\$ 187,92	\$ 187,92
UB (=)		\$ 3.449,36	\$ 3.449,36	\$ 3.449,36
Inversión	\$ (1.603,0)			
Flujo Neto	\$ (1.603,0)	\$ 3.449,36	\$ 3.449,36	\$ 3.449,36

Elaboración propia

Tabla 3.7 Indicadores financieros

Tasa	30%
VAN	\$ 4.661,4
TIR	208%
PAYBACK	6 meses

CAPÍTULO 4

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El agua es un recurso limitado, lograr un ahorro en el mismo impacta en el desarrollo sostenible y sustentable de las operaciones de las industrias alimenticias. La empresa objeto del estudio tiene como principal proveedor de este servicio a la red pública de la ciudad de Guayaquil. Por tanto, disminuyendo su consumo se reduce el costo a pagar en la planilla y se aumenta la disponibilidad de agua para la población guayaquileña, además de los impactos ambientales positivos que genera un manejo responsable.

4.1 Conclusiones

- La creación del mapa de agua ayuda a identificar las áreas donde enfocar los esfuerzos para reducir el consumo de agua en la fábrica.
- La implementación del proyecto de recirculación parcial de agua en bombas de vacío en la preparación de mostaza prevé una reducción del consumo de agua mensual para el medidor de limpieza de un 79%. El KPI de agua se reduce un 8% pasando de 1,65 m³/Ton a 1,52 m³/Ton.
- El tiempo entre reposiciones en la recirculación parcial de agua en bombas de vacío depende de la temperatura inicial del líquido de servicio, el volumen de recirculación y el calor transferido por parte de la bomba y el vapor extraído del proceso de elaboración de mostaza.
- El control diario de los consumos de agua de la planta otorga una mayor rapidez en la respuesta a los distintos problemas que puedan presentarse en el día a día con respecto a consumos anómalos.
- El VAN del proyecto fue de \$4.569 con un período de recuperación de seis meses. Es un proyecto financieramente viable.

4.2 Recomendaciones

- Instalar un medidor individual para la reposición de agua a la bomba de vacío de preparación de mostaza con el cual se espera medir de forma directa el consumo de agua por reposición en el sistema de recirculación parcial.

- Replicar el sistema de recirculación parcial de agua en las bombas de vacío para el proceso de preparación de salsa de tomate y mayonesa.
- Mantener actualizado el archivo de consumo diario de agua para todos los medidores de la fábrica repartiendo la responsabilidad entre el personal de servicios industriales.
- Construir la estación de inyección de químico para el área de culinarios la cual tiene como objetivo disminuir el óxido al interior de las tuberías, reduciendo así la cantidad de partículas disueltas que llegan al caldero por medio de retorno de condensado.
- Adaptar al sistema de recirculación de torre de enfriamiento el agua que consume la sacadora industrial.
- Crear campañas de concienciación en ahorro de agua entre el personal de fábrica, con el objetivo de mejorar el reporte de fugas existentes en tuberías.

REFERENCIAS

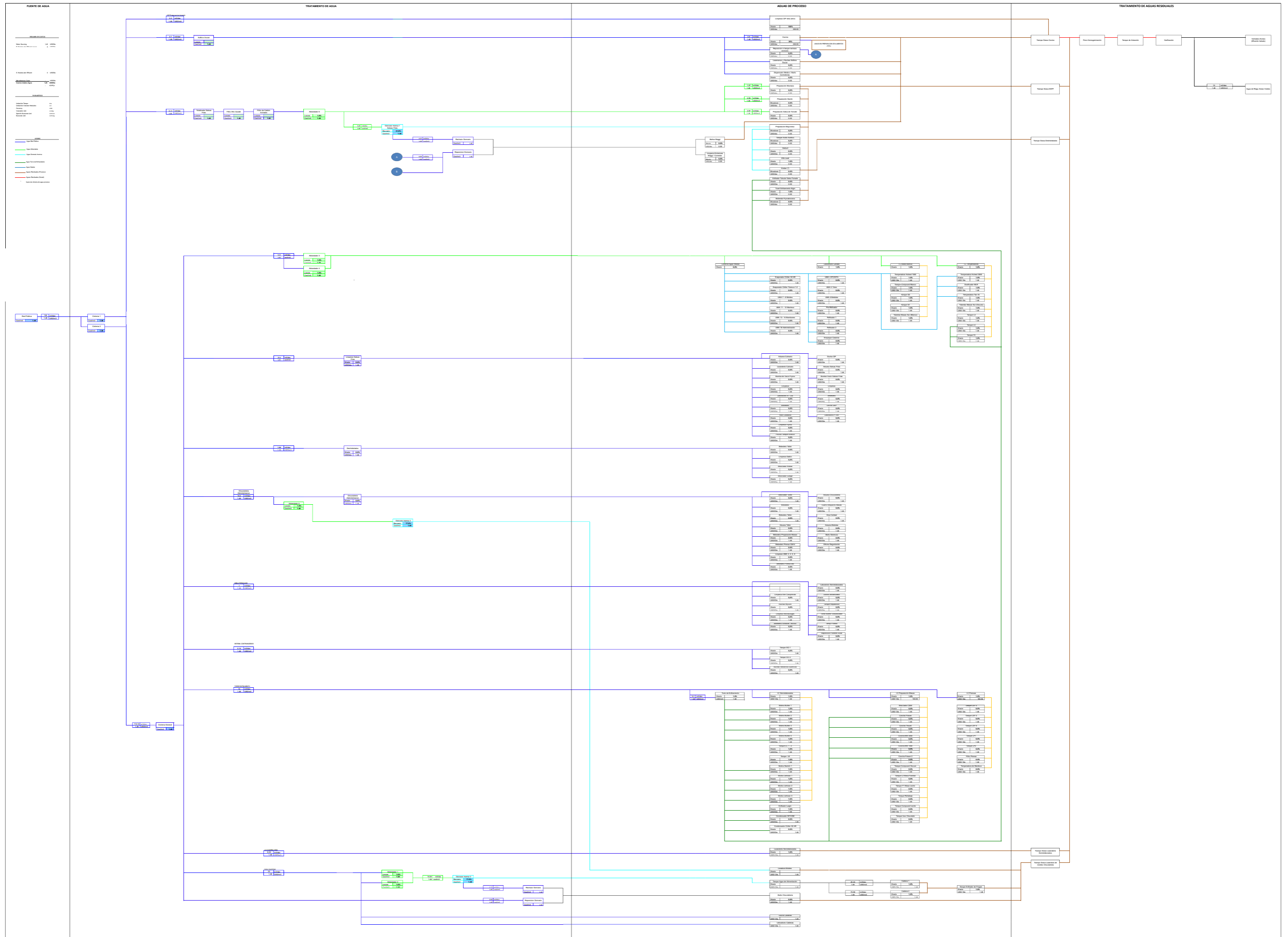
- Baud, P. (2015, Marzo). Factory Water Mapping & Opportunity Assessment.
- Besterfield, D. (2009). *Control de calidad*. México: PEARSON.
- Cheong Wong, K. (2011, Marzo 29). *Using an Ishikawa diagram as a tool to assist memory and retrieval of relevant medical cases from the medical literature*. Retrieved from Journal of Medical Case Reports: <https://jmedicalcasereports.biomedcentral.com/articles/10.1186/1752-1947-5-120>
- Cyger, M. (s.f). *Voice of Costumer (VoC)*. Retrieved from iSixSigma: <https://www.isixsigma.com/dictionary/voice-of-the-customer-voc/>
- García, J. (2013, 04 15). *EL PROJECT CHARTER*. Retrieved from Escuela de Organización Industrial: <http://www.eoi.es/blogs/madeon/2013/04/15/el-project-charter/>
- Gutiérrez, H. (2009). *Control estadístico de la calidad y seis sigma*. México D.F.: McGraw-Hill.
- INEC. (2012). *Información ambiental en hogares*. Guayaquil.
- Mestres, M. (2014, Agosto 01). *¿Qué son los indicadores dentro de una gestión basada en procesos?* Retrieved from Captio: <http://www.captio.net/blog/que-son-los-indicadores-dentro-de-una-gestion-basada-en-procesos>
- Montgomery, D. (2009). *Introduction to statistical quality control*. Jefferson City.
- Nationals Instruments. (s.f). *¿Qué es LabVIEW?* Retrieved from LabVIEW Web: <http://www.ni.com/es-cr/shop/labview.html>
- Perlman, H. (2017, Agosto 29). *Distribución del agua de la tierra*. Retrieved from USGS: <http://water.usgs.gov/gotita/waterdistribution.html>
- Pompetravaini. (s.f). *Manual Operativo de la bombas de vacío y compresores de anillo líquido*. Milano, Italia.
- Sterling SIHI. (s.f). *Liquid ring vacuum pumps*. Retrieved from FLOWSERVE: <http://www.sterlingsihi.com/cms/en/England/home/products-services/vacuum-pumps/liquid-ring-vacuum-pumps/in-compact-design/series-lem-lel.html>
- UPC. (2010). *Resumen de los Modelos Kaizen, Lean y Six Sigma*. Obtenido de Universidad Politécnica de Cataluña: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/10317/A.4.%20Resumen%2>

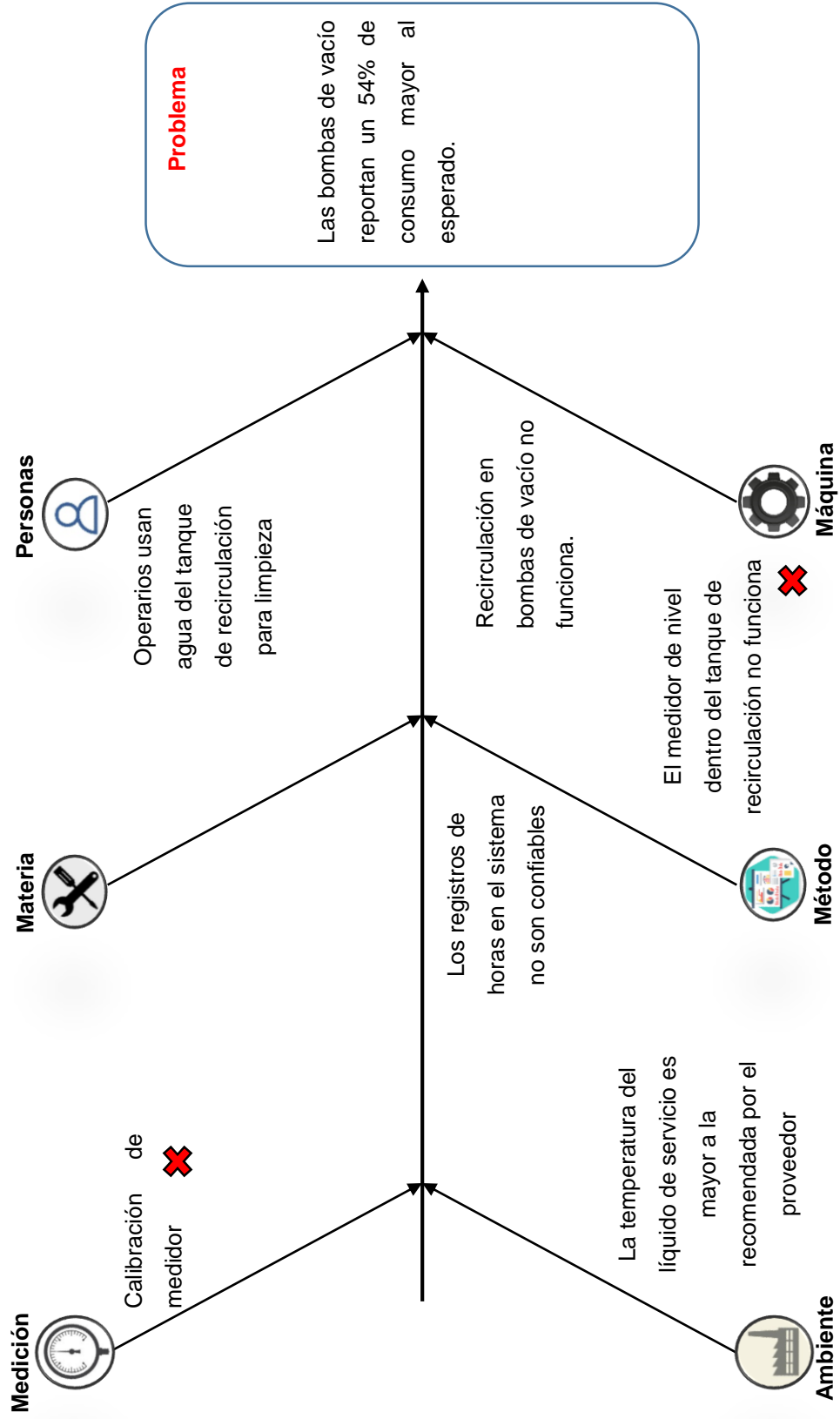
0de%20los%20modelos%20Kaizen,%20Lean%20y%20Six%20Sigma.pdf?sequence=5

WRAP. (s.f). *Water Minimisation in the food and drink industry*. Retrieved from Waste and Resources Action Programme:
<http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Water%20Minimisation%20in%20FD%20Industry.pdf>

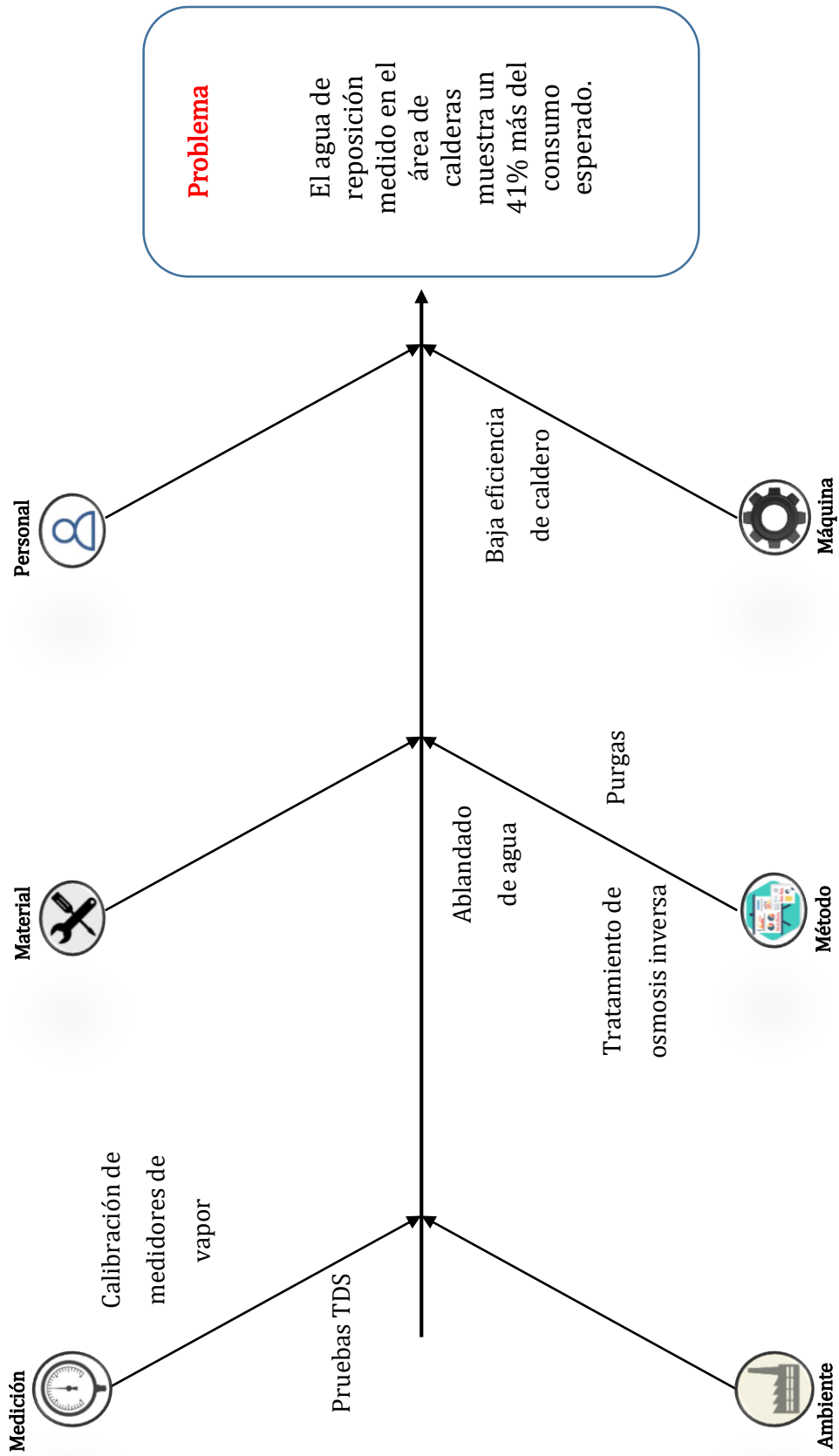
ANEXOS

ANEXO 1 Water Mapping de la fábrica





ANEXO 2 Diagrama Causa-Efecto. Área de Limpieza



ANEXO 3 Diagrama Causa-Efecto. Área de Calderos

Causas	1. ¿Por qué?	2. ¿Por qué?	3. ¿Por qué?
Los registros de horas en el sistema no son confiables	Horas de producción no incluidas en TBP	Algunas horas de producción son registradas como paraos no planeados	Operarios no dominan la clasificación de horas de producción
La temperatura del líquido de servicio es mayor a la recomendada por el proveedor	Promedio de temperatura 27°C	Chiller fuera del área mantiene la temperatura a 25°C y en el traslado gana calor	
Recirculación en bombas de vacío no funciona.	Agua se calienta muy rápido	Bajo volumen de recirculación	Conexión de descarga en tanque de recirculación a bajo nivel
	Cavitación de bomba	Baja presión en bomba	aire dentro de la bomba
	Difícil control de recirculación	Apertura de válvulas manuales	Sistema de recirculación manual

ANEXO 4 Cinco ¿Por qué?. Área de Limpieza

Causas	1. ¿Por qué?	2. ¿Por qué?	3. ¿Por qué?	4. ¿Por qué?
Purgas	Pruebas de TDS > 2.000 ppm	Retorno de condensado con partículas disueltas	Tuberías de vapor oxidadas interiormente	Químico inyectado a vapor no se distribuye a todo el Sistema de tuberías
Ablandado de agua	Desperdicio de agua	Regeneración diaria de tanques	Baja cantidad de salmura en tanque de restrolavado	
Osmosis Inversa	Bajo volumen de permeado	Baja presión aplicada a tanques de osmosis inversa	Presión no especificada para proceso de osmosis inversa	
Bajo retorno de condensado	Fugas de vapor en tuberías	Deterioro de tuberías y aislante térmico		
	Vapor inyectado directamente al área de lavandería			

ANEXO 5 Cinco ¿Por qué?. Área de Calderos