



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

**DISEÑO DE UN PROCESO DE RECUPERACIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO
DE FLUJOS DE RECHAZO EN UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE AGUA PARA
INYECCIÓN EN UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA**

Francisco Rodolfo López Pacay

Asesorado por el Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

Guatemala, junio de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN PROCESO DE RECUPERACIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO
DE FLUJOS DE RECHAZO EN UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE AGUA PARA
INYECCIÓN EN UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

FRANCISCO RODOLFO LÓPEZ PACAY

ASESORADO POR EL ING. CARLOS HUMBERTO PÉREZ RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

GUATEMALA, JUNIO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Inga. Nora Leonor García Tobar
EXAMINADOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Ing. José Francisco Gómez Rivera
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN PROCESO DE RECUPERACIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO DE FLUJOS DE RECHAZO EN UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE AGUA PARA INYECCIÓN EN UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, con fecha 13 de Julio de 2018.

Francisco Rodolfo López Pacay

Guatemala, 20 de septiembre de 2019

Ingeniero César Ernesto Urquizú Rodas
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial
Facultad de Ingeniería
USAC

Ingeniero Urquizú:

Por este medio me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que se realizó la asesoría y revisión del trabajo de graduación titulado: "DISEÑO DE UN PROCESO DE RECUPERACIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO DE FLUJOS DE RECHAZO EN UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE AGUA PARA INYECCIÓN EN UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA". Desarrollado por el estudiante de Ingeniería Mecánica Industrial, Francisco Rodolfo López Pacay, que se identifica con CUI – 2702086740101 y registro académico 2014-03583.

Habiendo seguido las recomendaciones de la asesoría y realizado los cambios pertinentes, estoy plenamente conforme con el proyecto planteado y las soluciones otorgadas, por lo cual me remito a aprobar el trabajo de graduación.

Atentamente,



Carlos Humberto Pérez Rodríguez
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL
Colegiado 3071

Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Ingeniero Mecánico Industrial
Colegiado 3071



REF.REV.EMI.131.019

Como Catedrático Revisor del Trabajo de Graduación titulado **DISEÑO DE UN PROCESO DE RECUPERACIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO DE FLUJOS DE RECHAZO EN UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE AGUA PARA INYECCIÓN EN UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA**, presentado por el estudiante universitario **Francisco Rodolfo López Pacay**, apruebo el presente trabajo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Victor Hugo Garcia Roque
Catedrático Revisor de Trabajos de Graduación
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala, noviembre de 2019.

/mgp



ESCUELA DE
INGENIERÍA MECÁNICA INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

REF.DIR.EMI.052.020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del trabajo de graduación titulado **DISEÑO DE UN PROCESO DE RECUPERACIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO DE FLUJOS DE RECHAZO EN UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE AGUA PARA INYECCIÓN EN UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA**, presentado por el estudiante universitario **Francisco Rodolfo López Pacay**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Cesar Ernesto Urquizu Rodas
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial




Guatemala, julio de 2020.

/mgp

DTG. 148.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN PROCESO DE RECUPERACIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO DE FLUJOS DE RECHAZO EN UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE AGUA PARA INYECCIÓN EN UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA**, presentado por el estudiante universitario: **Francisco Rodolfo López Pacay**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, julio de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por permitirme concluir un sueño y ser mi guía en todo momento, una importante influencia en mi carrera y vida personal.

Mis padres

Francisco López Pérez y Diana Pacay Juárez, ellos siempre me demostraron su amor y apoyo, hoy estoy aquí gracias a ustedes y sus consejos clave.

Mis hermanos

Gracias por brindarme su apoyo incondicional en muchos momentos, ustedes me inspiran a ser mejor.

Mis amigos

Amigos de la facultad y amigos de la iglesia, gracias por todo su apoyo y por ser parte importante en mi carrera. Agradezco conocer a personas tan extraordinarias.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por convertirse en un lugar de muchas oportunidades y brindarme desarrollo personal.
Facultad de Ingeniería	Por fortalecer las competencias necesarias en mi carrera profesional y así desenvolverme en el ámbito laboral.
Mis amigos de la Facultad	Por apoyarme en muchos momentos y compartir durante la carrera momentos inolvidables.
Ing. Carlos Pérez	Por compartir su tiempo y conocimientos para la realización de este proyecto.
Ana Domínguez	Por el apoyo y motivación en muchos momentos.
Ing. Alberto Pineda	Por darme la oportunidad, su apoyo y valiosos consejos para el desarrollo de este proyecto.
José Mazariegos	Por su apoyo en muchos aspectos durante el proceso de realización del proyecto.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. ANTECEDENTES GENERALES	1
1.1. Información general de la empresa	1
1.1.1. Historia	1
1.1.2. Misión	2
1.1.3. Visión.....	2
1.1.4. Valores fundamentales	2
1.1.5. Valores transformadores	2
1.2. Estructura organizacional	3
1.2.1 Liderando con calidad	3
1.3. Certificaciones	4
2. DIAGNÓSTICO SITUACIONAL	5
2.1. Análisis técnico.....	5
2.1.1. Diagrama de etapas	5
2.1.2. Distribución en planta	7
2.1.3. Descripción del equipo	9
2.1.4. Principio de funcionamiento.....	9
2.1.5. Información general del agua	10

2.1.6.	El agua en la industria química	11
2.1.7.	Especificaciones técnicas del agua	12
2.1.7.1.	Especificaciones del agua potable	12
2.1.7.2.	Especificaciones de agua para inyección	15
2.2.	Maquinaria y equipo	16
2.2.1.	Operaciones involucradas	16
2.2.1.1.	Filtro de sedimentos mayor a 80 μm	16
2.2.1.2.	Bomba dosificadora de cloro	17
2.2.1.3.	Suavizadores catiónicos.....	17
2.2.1.4.	Bomba dosificadora de metabisulfito de sodio.....	18
2.2.1.5.	Bomba dosificadora de antiescalante.	18
2.2.1.6.	Filtro de sedimentos menores a 5 μm ..	19
2.2.1.7.	Ósmosis inversa.....	19
2.2.1.8.	Intercambiador térmico.....	20
2.2.1.9.	Destilador por termocompresión mecánica (PSMC)	20
2.2.1.10.	Tanque recolector de flujos de rechazo.....	23
2.2.1.11.	Tanque de almacenamiento WFI	23
2.2.1.12.	Generador de vapor puro	23
2.3.	Descripción de flujos de rechazo	25
2.3.1.	Especificaciones cualitativas del rechazo.....	25
2.3.2.	Especificaciones cuantitativas del rechazo	29
2.3.2.1	Pretratamiento	30
2.3.2.2	Tratamiento	32
2.3.2.3	Almacenamiento.....	34

	2.3.2.4	Rechazo general.....	35
	2.3.3.	Análisis de resultados e interpretación	36
	2.3.4.	Categorización.....	41
	2.3.5.	Consideraciones para muestreo.....	44
	2.3.6.	Delimitación de puntos de rechazo en el sistema de producción WFI.....	45
	2.3.7.	Motivos de puntos de rechazo	48
	2.3.8.	Recopilación de datos	49
	2.4.	Control estadístico	51
	2.4.1.	Análisis histórico de funcionamiento.....	51
	2.5.	Propuesta factible de utilización	62
3.		ANÁLISIS Y DESARROLLO DE DISEÑO.....	65
	3.1.	Sistema de recuperación de flujo	65
	3.1.1.	Características.....	65
	3.1.2.	Utilización.....	66
	3.1.3.	Importancia.....	66
	3.1.4.	Determinación del tamaño.....	67
	3.2.	Área de instalación	68
	3.2.1.	Verificación del terreno	68
	3.2.2.	Ubicación optimizada.....	68
	3.3.	Diseño técnico	69
	3.3.1.	Digitalización del sistema	70
	3.3.2.	Selección de herramienta y equipo.....	70
	3.3.3.	Selección de material conforme categoría.....	73
	3.3.4.	Dimensionamiento de diámetro de descarga (elevación)	75
	3.3.5.	Dimensionamiento de diámetro de succión (elevación)	76

3.3.6.	Altura dinámica total de bombeo	76
3.3.7.	Potencia de la bomba centrífuga.....	80
3.3.8.	Evaluación de NPSH.....	81
3.3.9.	Tanque de almacenamiento	82
3.4.	Instrumentación mecánica	85
3.4.1.	Criterios de medición.....	85
3.4.2.	Selección de equipo	86
3.5.	Equipo seleccionado	86
3.5.1.	Propuesta viable.....	87
3.5.2.	Flujo servido	88
3.5.3.	Razón y consecuencia	90
3.5.3.1.	Agua de rechazo para riego	92
3.5.3.2.	Agua de rechazo para caldera	92
3.5.3.3.	Agua de rechazo para sanitarios.....	92
3.5.3.4.	Agua de rechazo para lavandería	93
3.6.	Montaje de equipo.....	93
3.7.	Verificación del funcionamiento.....	93
3.7.1.	Calidad en la operación	94
3.7.2.	Operación y mantenimiento.....	94
3.8.	Propuesta viable	95
4.	ESTUDIO FINANCIERO	97
4.1.	Costo del proyecto	97
4.1.1.	Planificación de costos.....	97
4.1.1.1.	Costo de operación	98
4.1.1.2.	Costo de mantenimiento.....	99
4.1.2.	Proveedores	100
4.1.3.	Alternativas de inversión	101
4.2.	Evaluación de inversión	102

4.2.1.	Flujos de efectivo	102
4.2.2.	Valor presente neto (VPN).....	103
4.2.3.	Tasa interna de retorno (TIR)	104
4.2.4.	Costo anual equivalente	105
4.2.4.	Análisis costo beneficio	106
4.3.	Evaluación ambiental	107
4.3.1.	Posibilidad de impacto al ambiente	107
4.3.2.	Acciones proambiente	108
5.	MEJORA CONTINUA.....	109
5.1.	Medición y registro	109
5.1.1.	Valores de producción	109
5.1.2.	Indicadores de trabajo	109
5.1.3.	Formatos de registro.....	111
5.2.	Mantenimiento de equipos.....	112
5.2.1.	Manejo y uso.....	112
5.2.2.	Controles	114
5.2.3.	Inspecciones y auditorias	114
5.3.	Servicio de agua.....	115
5.4.1.	Plan alternativo.....	115
	CONCLUSIONES	117
	RECOMENDACIONES	119
	BIBLIOGRAFÍA	121

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Organigrama del departamento de mantenimiento e infraestructura	3
2.	Diagrama de etapas de agua para inyección	6
3.	Diagrama de producción de agua potable.....	7
4.	Diagrama de producción de agua para inyección	8
5.	Uso del agua en la industria química	12
6.	Características físicas y organolépticas que debe tener el agua para consumo humano.....	13
7.	Características químicas que debe tener el agua para consumo humano	14
8.	Valores guía para verificación de la calidad microbiológica del agua ..	14
9.	Obtención y uso del agua para inyectables.....	15
10.	Valores para verificación de calidad del agua para inyección	16
11.	Destilador por termocompresión mecánica (PSMC)	22
12.	Sistema de producción de agua para inyección	25
13.	Análisis cualitativo de agua suavizada y agua desionizada	26
14.	Análisis cualitativo de agua condensada en procesos de destilación e intercambiador de calor.....	27
15.	Análisis de agua concentrada del flujo de rechazo general	28
16.	Porcentaje de participación en el flujo general de rechazo	37
17.	Valores de conductividad en puntos de rechazo	38
18.	Valores de potencial de hidrógeno en puntos de rechazo.....	39
19.	Valores de total de sólidos disueltos en puntos de rechazo	40

20.	Caracterización del agua potable comparada con el flujo de rechazo general del sistema.....	42
21.	Caracterización del agua potable comparada con el flujo de rechazo en ósmosis inversa	42
22.	Caracterización del agua potable comparada con el flujo de rechazo por destilador por termocompresión	43
23.	Caracterización del agua potable comparada con el flujo de rechazo del intercambiador de calor DTS	43
24.	Sinóptico de pretratamiento, agua suavizada	46
25.	Sinóptico de pretratamiento, agua desionizada	47
26.	Sinóptico de tratamiento, agua para inyección	47
27.	Sinóptico de almacenamiento, agua para inyección	48
28.	Consumo de agua por departamento, año 2015	55
29.	Producción por hora de destilador en sistema WFI, año 2017	55
30.	Consumo de agua parcial por área, año 2018.....	59
31.	Sistema de recuperación de agua	70
32.	Propiedades físicas y químicas de CPVC	74
33.	Variación del tanque pulmón versus tiempo	84
34.	Variación del tanque elevado versus tiempo	85
35.	Porcentaje de agua rechazada en tratamiento de aguas.....	89
36.	Registro analítico de agua potable contra agua rechazada	91
37.	Plano general del sistema de recuperación de agua	96
38.	Registro de producción de agua recuperada	111
39.	Registro de análisis de agua recuperada	112

TABLAS

I.	Resultados de análisis de pretratamiento del agua	26
II.	Resultados de análisis de tratamiento del agua.	27

III.	Resultados de análisis del agua general rechazada	28
IV.	Resultados de análisis cuantitativo, etapa de pretratamiento	31
V.	Resultados de análisis cuantitativo, etapa de tratamiento.....	33
VI.	Resultados de análisis cuantitativo, almacenamiento	34
VII.	Resultados de análisis cuantitativo de tanque recolector.....	36
VIII.	Cuadro de resultados para muestreo	50
IX.	Histórico de producción de WFI comparado al consumo de agua potable, año 2015	52
X.	Análisis histórico del aprovechamiento de los sistemas de tratamiento de agua, año 2015	53
XI.	Análisis de consumo de agua potable por áreas.....	54
XII.	Análisis histórico de aprovechamiento de producción WFI en comparación al consumo de agua potable, año 2018	56
XIII.	Histórico de aprovechamiento de producción WFI, año 2018.....	57
XIV.	Análisis de consumo de agua potable por área	58
XV.	Aprovechamiento histórico del sistema WFI año 2015 – 2018.....	60
XVI.	Consumo de agua potable por área, año 2015 – 2018.	61
XVII.	Promedio de uso mensual de agua potable por área.....	61
XVIII.	Herramienta para el montaje del sistema.....	71
XIX.	Equipo necesario para el sistema de recuperación.....	72
XX.	Tubería CPVC para distribución de agua.....	74
XXI.	Coeficiente de pérdidas K por accesorio.....	79
XXII.	Cuadro de resultados para diseño del sistema de bombeo	82
XXIII.	Flujo rechazado en el sistema de agua desmineralizada.....	89
XXIV.	Costo de operación del sistema de recuperación	99
XXV.	Costo de mantenimiento del sistema de recuperación.....	100
XXVI.	Propuesta de costo del proyecto por fases	101
XXVII.	Flujos de efectivo proyectado en 12 meses	103
XXVIII.	Valor presente neto hacia 1 año de operación.....	104

XXIX.	Tasa Interna de Retorno valuada en 12 meses	105
XXX.	Análisis de costo anual equivalente	106
XXXI.	Análisis de costo beneficio.....	107
XXXII.	Características técnicas de operación del sistema.	110
XXXIII.	Características fisicoquímicas de operación del sistema.....	110

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
HP	Caballo de fuerza
°C	Grados celsius
h	Horas
kPa	Kilopascal
L	Libras
m	Metro
m³	Metros cúbicos
μS	Microsiemens, conductancia eléctrica
mm	Milímetro
mV	Milivoltios, potencial eléctrico
N	Newton
ppb	Partes por billón
ppm	Partes por millón
pH	Potencial de hidrógeno
s	Segundos

GLOSARIO

Absorber	Atraer y retener un cuerpo sólido, líquido o gaseoso.
Adsorber	Atraer y retener en la superficie de un cuerpo, moléculas o iones de otro cuerpo.
Agua cruda	Corresponde al agua obtenida del pozo, extraída mediante la bomba sumergible sin ningún tratamiento químico o microbiológico.
Agua desionizada	Es aquella agua a la cual se le han quitado los cationes, como los de sodio, calcio, hierro, cobre y otro, mediante un proceso de intercambio iónico.
Agua para inyección	Corresponde al agua de procesamiento que se emplea en la fabricación de productos orales, productos para uso parenteral y todas aquellas actividades de operación en limpieza de equipos.
Agua potable	Corresponde a agua cruda o de pozo, a la cual se le adiciona por medios adecuados hipoclorito de sodio al 12 %, para efectos de controlar la carga microbiológica.
Agua purificada	Se obtiene a partir del agua potable, a la cual por un proceso adicional de intercambio iónico se le han

removido los aniones (carga negativa) como por ejemplo, cloro, sulfato, hidróxido, nitrato y bicarbonato y los cationes (carga positiva), como calcio y el magnesio.

**Análisis
microbiológico**

Técnicas de cultivo e incubación que permiten determinar la presencia de microorganismos en una muestra, proceso o producto.

Antiescalante

Sustancia utilizada para reducir la cantidad de contaminantes que se adhieren a la superficie de las membranas de ósmosis inversa durante la producción.

BPM

Las buenas prácticas de manufactura son conjunto de normas y procedimientos, destinados a garantizar que los productos farmacéuticos tengan y mantengan la identidad, pureza, e inocuidad requeridas durante su periodo de eficacia.

Calibración

Conjunto de operaciones que determinan, bajo condiciones especificadas, la relación entre los valores indicados por un instrumento o sistema de medición.

Característica física

Aquellas cualidades exteriores de un humano o cosa, las cuales sirven para diferenciarlo del resto de sus semejantes.

Característica química	Las características químicas se determinan por ensayos químicos y están relacionadas con la reactividad de las sustancias químicas.
Carbono orgánico total	Es la cantidad de carbono unido a un compuesto orgánico que se utiliza frecuentemente como un indicador no específico de calidad del agua o del grado de limpieza de los equipos de fabricación de medicamentos.
Cloro libre	El cloro presente en el agua se aglutina con las bacterias, dejando solo una parte de la cantidad original llamada "cloro libre".
Concentración	Relación, asociación o proporción que se puede establecer al comparar la cantidad de soluto y el nivel de disolvente presentes en una disolución.
Conductividad	Expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica.
Contaminación	Presencia de entidades físicas, químicas o biológicas indeseables.
Destilación	Procedimiento que separa las impurezas del agua, calentándola hasta formar vapor y luego, por enfriamiento, condensar el vapor que resulta como agua destilada.

Disolvente	Líquido que propicia la separación de las moléculas o las partículas de un gas, un sólido u otro fluido.
Disponibilidad	Situación o cualidad de disponible o de lo que puede ser utilizado.
Endotoxina	Son compuestos químicos complejos que se encuentran exclusivamente en la membrana externa de la pared celular de las bacterias.
Especificaciones	Determinación, explicación o detalle de las características o cualidades de una cosa.
Excipiente	Sustancia que se mezcla con los medicamentos para darles consistencia, forma, sabor u otras cualidades que faciliten su uso.
Farmacopea	Se refiere a libros recopilatorios de recetas de productos con propiedades medicinales reales o supuestas, en los que se incluyen elementos de su composición y modo de preparación.
Fisicoquímico	Es un estudio que se hace a todo aquello que funciona por medio de interacciones de la química con el movimiento y todo aquello que es físico.
Metabisulfito de sodio	Agente reductor utilizado para la eliminación de cloro previo al ingreso de las membranas de ósmosis inversa (composición química, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$).

Metodología	Puede entenderse a la metodología como el conjunto de procedimientos que determinan una investigación de tipo científico o marcan el rumbo de una exposición doctrinal.
Microbiana	De los microbios o relacionado con ellos.
Muestra	Porción extraída de una sustancia o producto representativa de la misma, que sirve para conocer por medio de métodos su identidad. Son de carácter físico y químico relacionadas a la calidad.
Organoléptico	Hace referencia a cualquier propiedad de un alimento u otro producto percibida mediante los sentidos, incluidos su sabor, color, olor y textura.
Parenteral	Que se efectúa por una vía distinta de la digestiva o intestinal. Se aplica a las sustancias líquidas, sean nutrientes o medicamentos, que se introducen en el organismo por vía subcutánea, intrarraquídea, intramuscular o intravenosa.
Potencial Redox	Es una medida de la actividad de los electrones, está relacionado con el pH y con el contenido de oxígeno.
Purificación	En el caso específico del agua, su purificación consiste en reducir el nivel de sustancias dañinas para

el organismo, como bacterias, componentes tóxicos, entre otros.

Reactivo	Sustancia que, por su capacidad de provocar determinadas reacciones, sirve en los ensayos y análisis químicos para revelar la presencia o medir la cantidad de otra sustancia.
Regeneración	Es el proceso por el cual se devuelve a la resina su capacidad de intercambiar iones.
Rotámetro	Es un medidor de caudal en tuberías de área variable, de caída de presión constante.
Sanitización	Reducción sustancial del contenido microbiano, sin que se llegue a la desaparición total de microorganismos patógenos.
Sinergia	Incremento de la acción de diversas sustancias debido a que actúan conjuntamente.
Sólido total disuelto	Es una expresión para el contenido combinado de sustancias inorgánicas y orgánicas contenidas en un líquido. El uso principal del TDS está en el estudio de calidad del agua.
Variador de frecuencia	Dispositivo electrónico que controla las revoluciones por minuto de un motor con respecto a la aplicación.

RESUMEN

La industria farmacéutica se define por sus altos estándares de calidad y servicio a la población, debido a la naturaleza de la manufactura que se lleva a cabo en estos centros de producción y la importancia de cada producto en la salud de los consumidores. Por ello, esta industria requiere de organización, dirección y controles en los procesos productivos; como resultado se tiende a descartar todo aquello que no entre en los parámetros establecidos por las normativas que la rigen tanto nacional como internacionalmente, específicamente cuando se trata de los insumos para la creación de productos parenterales.

En este contexto, los sistemas de tratamiento y purificación del agua entran en juego y se vuelven un proceso clave para la obtención de lo que se conoce como agua para inyección (WFI), que se convierte en la materia prima para los procesos posteriores. Se parte del agua potable, la cual pasará por diferentes etapas como suavización, desionización y destilación antes de llegar a convertirse en WFI. A su vez, existen diferentes operaciones en las etapas mencionadas, dentro de las cuales se puede mencionar los suavizadores catiónicos, filtros de sedimentos, ósmosis inversa, intercambiadores de calor y termocompresor.

Sin embargo, durante cada una de estas operaciones por las que deberá pasar el agua existen controles que aceptará o rechazará el agua, dependiendo ciertas normativas y parámetros que se debe cumplir para la producción de agua para inyección. Es un proceso como muchos otros, en donde habrá mermas debido a la calidad requerida.

Así que los flujos de agua rechazada por las distintas operaciones representan una oportunidad de mejora. Al realizar la captación de estos flujos, ingresa en un proceso para que sea nuevamente agua potable y reenviarlos hacia un servicio interno que requiera agua se convierte en una opción muy viable, al optimizar el recurso hídrico.

Por ese motivo se diseñará un sistema capaz de captar los flujos de agua rechazada, transformarla y distribuirla nuevamente hacia puntos clave donde exista consumo de agua con bajo requerimiento de perfil del agua y consumo medio. Resulta una inversión a mediano plazo en donde existe un mejor control de los recursos naturales, se evita la producción de agua potable para las áreas donde se aprovechará este medio y un ahorro considerable a largo plazo, debido a que es una opción financieramente viable.

OBJETIVOS

General

Diseño de un proceso de recuperación de flujos de rechazo para su aprovechamiento en un sistema de agua para inyección en una industria farmacéutica.

Específicos

1. Realizar un análisis técnico al sistema de producción de agua para inyección con el propósito de diagnosticar los flujos de rechazo.
2. Identificar las causas y especificaciones, tanto de forma cualitativa como cuantitativa, sobre la calidad del flujo de agua rechazada.
3. Formar las posibles alternativas y oportunidades que se pueda determinar a partir de conceptos de diseño con base en necesidades y especificaciones establecidas.
4. Evaluar una propuesta útil que se ajuste a los parámetros establecidos y que contribuya al desarrollo de la empresa.
5. Calcular los valores económicos correspondientes respecto al costo y realización del proyecto.
6. Establecer la verificación ambiental de la propuesta seleccionada.

INTRODUCCIÓN

En la creación de productos parenterales, una industria farmacéutica requiere de un sistema especializado de producción de agua para inyección. Este es muy valioso y tiene estándares muy altos de calidad con el propósito de minimizar todos los contaminantes; por esa razón, cada operación en este proceso es un filtro para desechar tales contaminantes que pueda traer consigo el agua. En ese descarte de contaminantes se rechaza un flujo considerable de agua que previamente fue tratada y aunque no es aceptada dentro de los parámetros de agua con calidad WFI, puede ser categorizada como agua potable si pasa por una etapa de cloración.

Así como este proceso requiere de agua potable, muchos otros dentro de la planta de producción también requieren de este recurso. Así que se incurre en gastos para producir agua potable y satisfacer la necesidad de estos. Es aquí donde toma relevancia el diseño de un sistema de aprovechamiento de estos flujos rechazados.

El diseño de este sistema será de carácter auxiliar que apoyará constantemente a ciertas áreas. Está sujeto a la producción de agua para inyección; mientras exista producción se podrá satisfacer 3 grandes áreas en planta. Una de ellas es el área de calderas, que requiere de un perfil de agua con mínima dureza; sanitarios, área que no entra en contacto con el ser humano; lavandería, donde el perfil de agua rechazada no entra en conflicto con el tipo de detergentes y su rendimiento.

El sistema de recuperación se vuelve una opción muy atractiva debido a dos puntos en particular: el consumo de agua potable requerido en la planta disminuye un 10 % y segundo, la evaluación financiera determina un proyecto viable de inversión.

1. ANTECEDENTES GENERALES

1.1. Información general de la empresa

La industria farmacéutica de la cual se deriva el proyecto, se trata de un laboratorio líder del mercado farmacéutico de la región latinoamericana que desarrolla, produce y comercializa más de 1 200 medicamentos para uso humano y veterinario.

Actualmente ha logrado trascender a lo largo de los años a través de productos de calidad; conjuga lo mejor del conocimiento y tecnología europea, complace con los requerimientos y necesidades del exigente mercado latinoamericano, a precios competitivos.

1.1.1. Historia

Su primera planta de producción se establece en Guatemala en 1976. Fue una de las primeras en América Latina en fabricar productos de liberación controlada en forma de microgránulos, con equipo completamente automatizado y de alta tecnología.

Fue en la década de los 90 que esta planta alcanza su presencia regional en toda Centroamérica, México y Colombia, y da un paso de gran escala como industria farmacéutica.

1.1.2. Misión

“Desarrollar y ofrecer productos y soluciones innovadoras, con alto valor agregado, a precios competitivos, para mejorar la salud y bienestar.”¹

1.1.3. Visión

“Ser una empresa global en el mercado latinoamericano de la salud, con soluciones de calidad, que generen valor a la sociedad.”²

1.1.4. Valores fundamentales

- Honestidad
- Transparencia
- Lealtad
- Productividad
- Responsabilidad
- Respeto

1.1.5. Valores transformadores

- Innovación
- Disposición al cambio
- Trabajo sinérgico
- Actitud de servicio
- Mejora continua

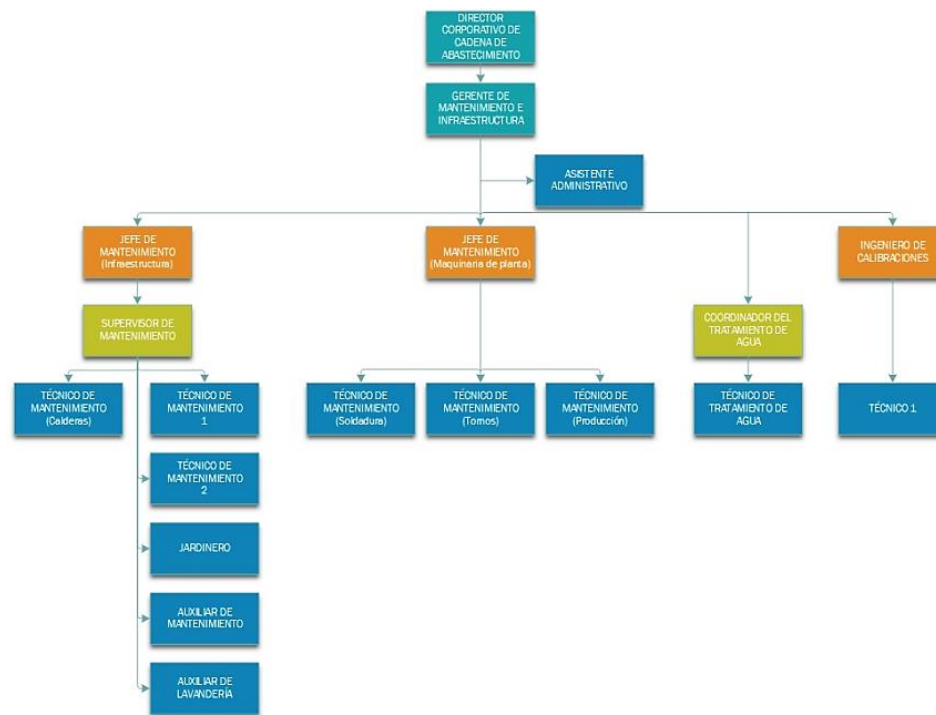
¹ Empresa farmacéutica, disponible en: grupounipharm.com.

² *Ibíd.*

1.2. Estructura organizacional

En el organigrama se detallan las jerarquías de mando que existen en el departamento de mantenimiento para administración de responsabilidades.

Figura 1. Organigrama del departamento de mantenimiento e infraestructura



Fuente: Gerencia de mantenimiento, empresa farmacéutica.

1.2.1. Liderando con calidad

Este laboratorio continúa liderando con calidad a través de cada uno de sus colaboradores; ha logrado como resultado cumplir al máximo en todos los

procesos, buenas prácticas de manufactura y normativas al cuidar las materias primas de alta calidad y los más estrictos controles de seguridad.

1.3. Certificaciones

- OMS INFORME 32-92 (Buenas prácticas de manufactura)
- ONE KOSHER
- RTCA (Reglamento técnico centroamericano)
- ISO 9 001
- INVIMA

2. DIAGNÓSTICO SITUACIONAL

2.1. Análisis técnico

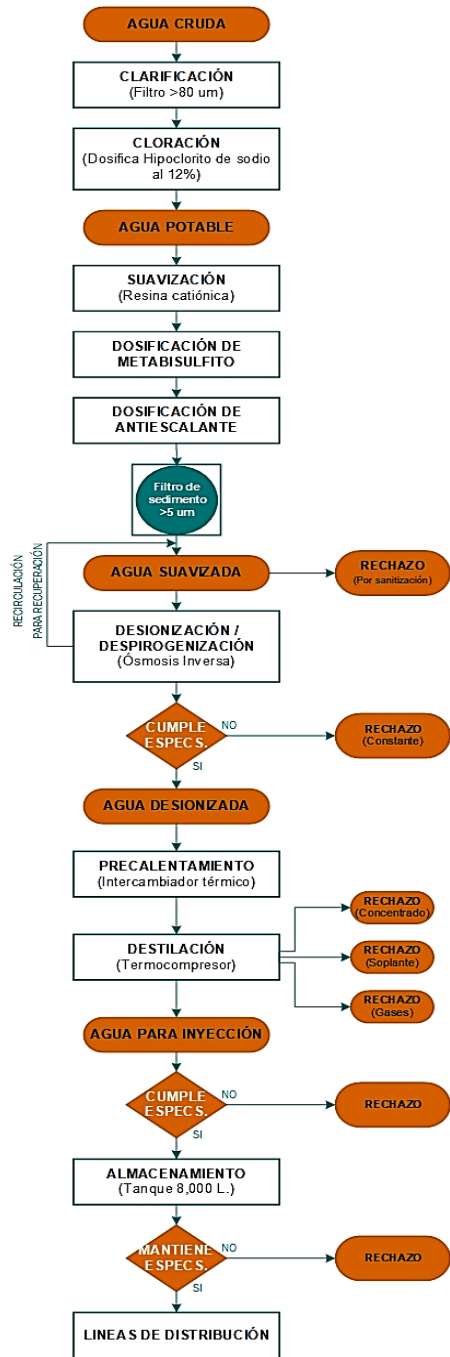
Las empresas farmacéuticas actuales han invertido un capital considerable en los equipos de purificación, instrumentación y ciclos de almacenamiento y distribución más avanzados. También en la calibración y la certificación de sus sistemas de agua, los cuales se pueden resaltar como equipos de gran relevancia dentro del proceso de manufactura de productos de carácter farmacéutico; esto, a su vez, corresponde a una clasificación de este tipo de sistemas con un grado crítico, ya que se debe atender con respecto a mantenimiento y control.

Es de gran relevancia el factor de disponibilidad durante la manufactura de productos de esta naturaleza, en relación a su amplio uso dentro de los procesos o servicios en los que se demanda agua de alta calidad.

2.1.1. Diagrama de etapas

En el proceso para la obtención de agua para inyección, según la USP, se desarrolla una serie de etapas y verificaciones durante el tratamiento hasta alcanzar y mantener el grado de pureza requerido, para el almacenamiento y la distribución hacia los puntos de uso. En algunas etapas del tratamiento se generan flujos de agua que el sistema rechaza.

Figura 2. Diagrama de etapas de agua para inyección

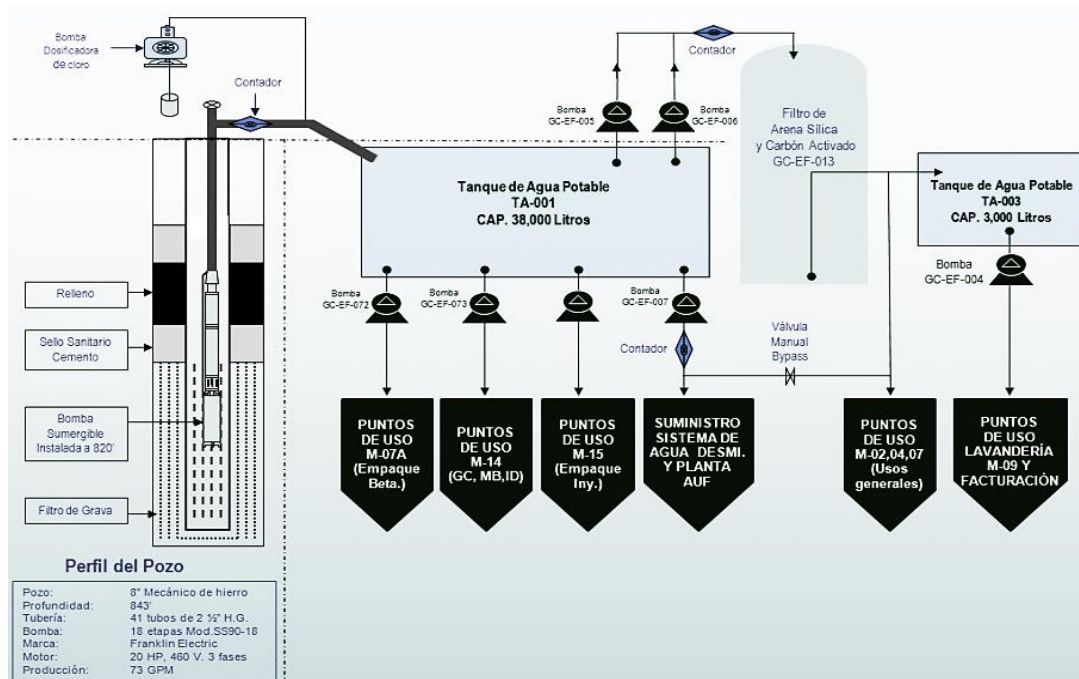


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Power Point.

2.1.2. Distribución en planta

En la planta del laboratorio farmacéutico se cuenta con un sistema de producción de agua potable, el cual entra en contacto directamente con un pozo profundo de donde se extrae agua cruda por medio de una bomba de 18 etapas. Esta será tratada posteriormente con las etapas de clarificación y cloración para alcanzar el grado de agua potable, como lo demanda la norma. Este tipo de agua se distribuirá hacia toda la planta por medio de las diferentes tuberías de distribución para su utilización; de esta manera, el agua es trasladada al edificio en donde se produce agua para inyección.

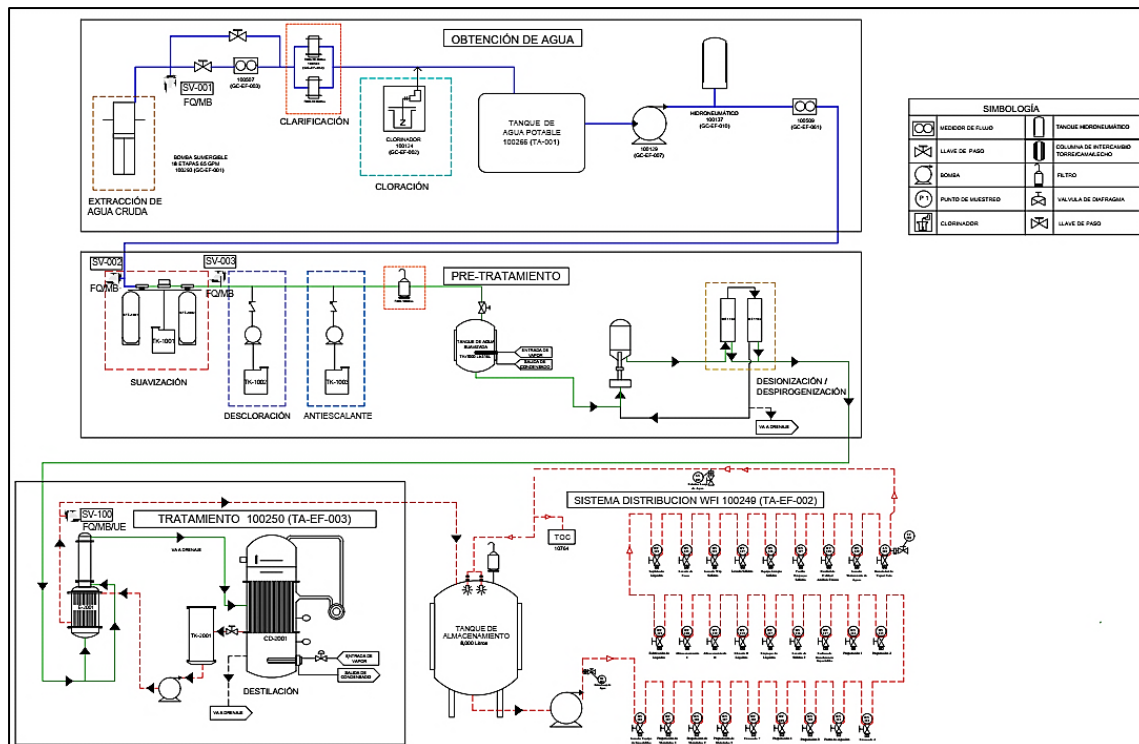
Figura 3. Diagrama de producción de agua potable



Fuente: Departamento de tratamiento de aguas, empresa farmacéutica.

El sistema de producción de agua para inyección es presentado en la figura 4. En este proceso están involucradas las etapas de pretratamiento y tratamiento a las que debe ser sometida el agua potable para que alcance el nivel de pureza que se requiere, según la USP. En el proceso de obtención de agua para inyección se identifica la generación de flujos de agua rechazada de acuerdo al diseño y funcionamiento de los equipos durante su operación. Es una cantidad considerable de agua que, a su vez, puede representar una oportunidad de aprovechamiento y mejora, si se adecua de forma integral en los procesos o servicios con los que se cuentan en la planta.

Figura 4. Diagrama de producción de agua para inyección



Fuente: departamento de tratamiento de aguas, GDN Water Treatment.

2.1.3. Descripción del equipo

El equipo de producción de agua para inyección es un sistema que produce agua con alto grado de pureza. Está totalmente construido con material de acero inoxidable AISI-316L con superficie activa decapada. Todas las soldaduras internas son TIG (*tungsten inert gas*); el control de los equipos se lleva a cabo a través de una interfaz SIEMENS, al igual que el sistema de distribución. Este tipo de equipos está calibrado para seguir las especificaciones de la USP, la cual rige este tipo de manufactura. Adicionalmente, el proceso cuenta con un equipo de producción de vapor puro, que funciona a partir del agua producida por el sistema WFI. Este tipo de vapor es utilizado principalmente para esterilización de equipo, instrumentos y algunas preparaciones farmacéuticas.

2.1.4. Principio de funcionamiento

El laboratorio cuenta con un pozo propio de agua como fuente principal de las operaciones unitarias para la producción de agua potable y agua para inyección. Debido a esto, la etapa de clarificación del agua se realiza a través de un filtro para retener sedimentos mayores a 80 micras. Posteriormente se dosifica hipoclorito de sodio para el control de la carga microbiológica.

A continuación, se elimina la dureza por medio de un filtro que contiene resinas catiónicas. Al agua suavizada obtenida se le dosifica una solución de metabisulfito de sodio de 1 600 ppm para neutralizar el cloro libre. Luego de esta operación se dosifica una solución de antiescalante de 10 ppm para evitar incrustación en las membranas de ósmosis inversa. El flujo de agua suavizada pasa por un filtro de sedimentos de profundidad, donde se eliminan los sedimentos mayores a 5 micras.

La etapa de pretratamiento finaliza con la ósmosis inversa, cuya función principal es realizar la desionización y despirogenización del agua por medio de dos membranas semipermeables de poliamida. El flujo permeado obtenido de ósmosis inversa pasa por el intercambiador térmico y aumenta su temperatura. Luego ingresa a la cámara del destilador por termocompresión y por medio del proceso de ebullición se genera vapor puro, el cual es aspirado por un soplante que lo comprime en un serpentín. En este proceso el vapor experimenta choque térmico y es condensado para convertirse en agua destilada (cumple con especificaciones de agua para inyección USP).

El flujo de agua destilada llena un tanque de reserva que posteriormente se envía a un tanque de almacenamiento de diseño sanitario con capacidad para 8 000 L. Finalmente, el agua es distribuida a 75 °C a los puntos de uso por medio de un *loop* que mantiene las especificaciones de calidad del agua para inyección.

2.1.5. Información general del agua

El agua es la sustancia más conocida y abundante de nuestro planeta. Está formada por dos átomos de hidrógeno y una de oxígeno. El volumen de toda el agua que se encuentra en la Tierra es de 1 386 millones de kilómetros cúbicos, del cual el 1 % corresponde a agua dulce. El valor corresponde a 14 millones de kilómetros cúbicos. Es importante destacar que el agua es el solvente universal utilizado en varios procesos industriales y no industriales. El agua es indispensable para el ser humano. Según el libro titulado “Fisiología humana: la base de la medicina” de Gillian Pocock, el agua en nuestro cuerpo, dependiendo de diferentes factores en cada persona, representa alrededor de 60 %; el otro 40 % corresponde a grasas, proteínas y minerales. El agua en la industria farmacéutica es el excipiente más comúnmente usado en la manufactura de los productos medicinales, integrado o no en la formulación final. Es un recurso

multifuncional que abarca todas las disciplinas de la industria, ya que se utiliza como materia prima, disolvente, ingrediente, reactivo, limpiador y lavado de equipos, recipientes o envases primarios.

El agua no existe precisamente pura en la naturaleza, debido a que por sus propiedades químicas es capaz de absorber, adsorber o suspender numerosos compuestos que conllevan la posibilidad de ser contaminantes que pueden resultar peligrosos para la salud, en preparaciones farmacéuticas de aplicación vía parenteral.

El agua usada en la industria farmacéutica se denomina agua de uso farmacéutico, y debe ser preparada a partir de agua potable y tiene diferentes calidades dependiendo de la vía de administración de los productos farmacéuticos: agua purificada (PW), agua altamente purificada (HPW) y agua para inyección (WFI), se emplean en los procesos farmacéuticos a partir del agua potable local, obtenida mediante el tratamiento del agua de alimentación.

2.1.6. El agua en la industria química

El uso del agua en la industria química proporciona un acercamiento del consumo de agua en este campo y su impacto en la economía, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 5. **Uso del agua en la industria química**

Industria	Uso anual de agua en miles de millones de galones						
	Categoría	Valor del embarque ^a	Número de plantas ^b	Consumo total ^c	Enfriamiento del proceso ^d	Enfriamiento del condensador ^e	Alimentación de calderas ^f
281—Productos químicos inorgánicos industriales	4.6	344	592	98	19	62	7
282—Productos plásticos y sintéticos	8.4	189	540	93	11	55	12
283—Drogas	6.0	97	NR	7	Nil	5	0.9
284—Jabones y detergentes	5.4	109	31	3	Nil	1	0.3
285—Pinturas y recubrimientos	0.7	36	NR	0.7	Nil	0.1	Nil
286—Productos químicos orgánicos industriales	10.7	291	1316	681	316	77	18
287—Productos químicos para la agricultura	2.1	126	221	41	NR	16	NR
28—TOTAL	39.7	1343	2927	929	348	227	44

^a En miles de millones de dólares
^b Cifra reportada en el censo
^c Sólo agua dulce
^d Agua total para enfriamiento de procesos
^e Agua total para condensación en las turbinas
^f Alimentación de calderas más otros usos varios
NR = no reportado

Fuente: FRESENIUS, WILHELM. *Manual de disposición de aguas residuales; origen, descarga y tratamiento de aguas residuales.* p 26-3.

2.1.7. Especificaciones técnicas del agua

Existen normas y entes reguladores internacionales que establecen los parámetros de especificaciones de calidad del agua para cada tipo de aplicación, bajo metodología analítica validada para obtener resultados fisicoquímicos y microbiológicos confiables.

2.1.7.1. Especificaciones del agua potable

El agua potable es aquella que por sus características físicas y químicas no representa un riesgo para la salud del consumidor. Este tipo de agua cumple a

nivel nacional con la norma técnica guatemalteca COGUANOR NTG-29001, agua para consumo humano (agua potable). El objetivo de esta norma es establecer los valores de las características que definen la calidad del agua apta para consumo humano y se aplica a fuentes como pozos, nacimientos, ríos, entre otros. El estudio mínimo en la etapa de control conlleva dos análisis importantes se debe tomar en cuenta: el microbiológico y el fisicoquímico.

El agua contiene características físicas y químicas; estas se originan debido a elementos y compuestos que se encuentran presentes en el agua. Se puede realizar su detección a través de medios analíticos de laboratorio. Las características mínimas de concentración percibidas de estos elementos que debe tener el perfil de agua potable se muestran en las siguientes imágenes.

Figura 6. **Características físicas y organolépticas que debe tener el agua para consumo humano**

Características	LMA	LMP
Color	5,0 u	35,0 u ^(a)
Olor	No rechazable	No rechazable
Turbiedad	5,0 UNT	15,0 UNT ^(b)
Conductividad eléctrica	750 μ S/cm	1500 μ S/cm ^(d)
Potencial de hidrógeno	7,0-7,5	6,5-8,5 ^{(c) (d)}
Sólidos totales disueltos	500,0 mg/L	1000,0 mg/L

(a) Unidades de color en la escala de platino-cobalto
 (b) Unidades nefelométricas de turbiedad (UNT).
 (c) En unidades de pH
 (d) Límites establecidos a una temperatura de 25°C.

Fuente: Ministerio de Economía, Comisión Guatemalteca de Normas, *COGUANOR NTG-29001*.

Figura 7. **Características químicas que debe tener el agua para consumo humano**

Características	LMA (mg/L)	LMP (mg/L)
Cloro residual libre ^(a)	0,5	1,0
Cloruro (Cl ⁻)	100,0	250,0
Dureza Total (CaCO ₃)	100,0	500,0
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	100,0	250,0
Aluminio (Al)	0,050	0,100
Calcio (Ca)	75,0	150,0
Cinc (Zn)	3,0	70,0
Cobre (Cu)	0,050	1,500
Magnesio (Mg)	50,0	100,0
Manganeso total (Mn)	0,1	0,4
Hierro total (Fe) ^(b)	0,3	-----

a) El Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social será el ente encargado de indicar los límites mínimos y máximos de cloro residual libre según sea necesario o en caso de emergencia.
b) No se incluye el LMP porque la OMS establece que no es un riesgo para la salud del consumidor a las concentraciones normales en el agua para consumo humano, sin embargo el gusto y apariencia del agua pueden verse afectados a concentraciones superiores al LMA.

Fuente: Ministerio de Economía, Comisión Guatemalteca de Normas, *COGUANOR NTG-29001*.

Figura 8. **Valores guía para verificación de la calidad microbiológica del agua**

Microorganismos	Límite Máximo Permisible
Agua para consumo directo Coliformes totales y <i>E. coli</i>	No deben ser detectables en 100mL de agua
Agua tratada que entra al sistema de distribución Coliformes totales y <i>E. coli</i>	No deben ser detectables en 100mL de agua
Agua tratada en el sistema de distribución Coliformes totales y <i>E. coli</i>	No deben ser detectables en 100mL de agua

Fuente: Ministerio de Economía, Comisión Guatemalteca de Normas, *COGUANOR NTG-29001*.

2.1.7.2. Especificaciones de agua para inyección

El agua para inyección es aquella obtenida por medio del método de destilación o un proceso de purificación equivalente o superior a la destilación en la eliminación de productos químicos y microorganismos. Se genera a partir de agua potable. Para obtener este tipo de agua con las calidades requeridas, es necesario seguir los procesos unitarios requeridos por la normativa americana para su fabricación. En la siguiente figura se compara el método de obtención de agua para inyección en cada farmacopea, en donde el método de destilación es requerido para la obtención de este tipo de calidad de agua. Se realiza con este método debido a que está destinada a la preparación de soluciones parenterales y de esta forma se logra evitar la contaminación microbiana.

Figura 9. **Obtención y uso del agua para inyectables**

Normativas	Agua para inyectables
Obtención	
Farmacopea Europea (Ph.Eur)	Destilación. Las superficies de contacto con el agua son de vidrio neutro (borosilicato), de cuarzo o de metal. La primera fracción de destilado debe rechazarse.
Farmacopea Americana (USP)	Destilación u ósmosis inversa.
Farmacopea Japonesa (JP)	Destilación u ósmosis inversa.

Fuente: Farmacopea Europea, Ph.Eur versión 9.1.

Las especificaciones para el agua de inyección deben cumplir según lo establecido en la norma de la Farmacopea de los Estados Unidos, mejor conocida como USP (United States Pharmacopeial). Para obtener este tipo de agua se empleará el sistema definido para purificar y alcanzar los estándares del

agua. En la figura 10 se detallan las especificaciones que contempla la Farmacopea Norteamericana para los dos tipos de agua más utilizados en el proceso de producción.

Figura 10. **Valores para verificación de calidad del agua para inyección**

Atributo	Agua Purificada (PW)	Agua Para Inyectable (WFI)
Coductividad (Ver anexo 1)	<1,3 μ S/cm a 25 °C	<1,3 μ S/cm a 25 °C
Carbono Orgánico Total (TOC)	<0,500 mg/litro	<0,500 mg/litro
Endotoxinas	No corresponde	<0,25 UE/ml
Microbiológico – Nivel de Acción	>100 ufc/ml	>10 ufc/100 ml

Fuente: Farmacopea de los Estados Unidos, USP 24.

2.2. Maquinaria y equipo

En este apartado se detallará las operaciones unitarias involucradas en el sistema de producción de agua WFI.

2.2.1. Operaciones involucradas

Una operación comprende el equipo involucrado para llevar a cabo la descontaminación del agua en cada etapa.

2.2.1.1. Filtro de sedimentos mayor a 80 μ m

El filtro de sedimentos mayores a 80 micras es la operación unitaria que forma parte de la producción de agua potable. Este equipo es el encargado de realizar la etapa de clarificación del agua. El elemento filtrante consiste en discos de nailon que realizan la captación de sedimentos en suspensión que contenga

el agua. El flujo máximo de operación es de 30 m³/h y posee manómetros al ingreso y a la salida para el monitoreo de la presión diferencial.

2.2.1.2. Bomba dosificadora de cloro

Su función es dosificar hipoclorito de sodio al 12 % al agua extraída del pozo. La etapa de cloración del agua es para convertirla en potable y es uno de los métodos de desinfección más comunes y eficaces, pues elimina gran parte de las bacterias, mohos y otros microorganismos peligrosos. Es uno de los procesos más importantes por los cuales debe pasar el agua durante su tratamiento para poder ser consumida, ya que sin esta etapa de cloración los microorganismos que tiene el agua imposibilitarían el consumo de la misma.

2.2.1.3. Suavizadores catiónicos

El suavizado del agua soluciona un problema conocido como "agua dura", es aquella que posee una dureza superior a 120 mg CaCO₃/L. Esto quiere decir que, principalmente tiene que ver con niveles de minerales elevados de calcio y magnesio, que pueden producir incrustación en las tuberías.

En esta etapa del proceso se cuenta con dos filtros suavizadores que contienen resinas catiónicas. Cuando uno de ellos está en producción, el otro se encuentra en regeneración o espera; este es el ciclo de trabajo de este equipo. La regeneración se realiza de forma automática y en ella se utiliza una solución sobresaturada de cloruro de sodio (salmuera). El servicio depende de las operaciones de llenado, sanitización de ósmosis inversa, sanitización del termocompresor y de la producción de agua para inyección.

2.2.1.4. Bomba dosificadora de metabisulfito de sodio

El metabisulfito de sodio es un sólido blanco y granular. Este material se utiliza en la operación de pretratamiento del agua para neutralizar la presencia de cloro libre residual del agua suavizada. Se trata de un compuesto inorgánico que actúa como agente limpiador, desinfectante, antioxidante y conservador en sistemas de ósmosis inversa, ya que las membranas de estas no son compatibles con el cloro y pueden sufrir daños irreversibles.

La operación consiste en dosificar metabisulfito de sodio a través de una bomba automática en línea, de tal forma que el caudal de este compuesto es variable y se encuentra en función de la concentración de cloro libre detectado en el agua de ingreso. La medida de calidad no debe sobrepasar los 400 mV. La solución debe prepararse a una concentración de 1 600 ppm en un tanque de 100 litros.

2.2.1.5. Bomba dosificadora de antiescalante

Es una operación que también forma parte del pretratamiento del agua, en la cual una bomba automática dosifica una solución de antiescalante con un caudal continuo que se aproxima al 1,10 L/h. La solución está preparada a una concentración de 10 ppm en un tanque de 100 litros, la cual se dosifica en el flujo de agua suavizada.

Esta operación se realiza con el propósito de inhibir la cristalización de sales y como dispersante en el sistema de tratamiento de ósmosis inversa. El antiescalante con base de fosfato forman ésteres con forma de escamas y se dispersan como sólidos suspendidos o como flujo de rechazo en la operación de

ósmosis inversa. Este tipo de antiescalante trabaja con diferentes rangos de pH y son compatibles con membranas poliamídicas. El funcionamiento depende de las operaciones de llenado, sanitización de ósmosis inversa, sanitización del destilador y de la producción de agua para inyección.

2.2.1.6. Filtro de sedimentos menores a 5 µm.

Esta operación se realiza por medio de un filtro de sedimentos de profundidad, que actúa como pantalla para remover partículas presentes en el agua. En una planta de tratamiento de aguas, estas partículas pueden ser derivadas de la corrosión de las tuberías del agua, granos de arena, pequeñas partículas de materia orgánica u otra partícula pequeña que esté presente en el agua suministrada. Es importante tener en cuenta que los filtros de sedimentos reducen sedimentos exclusivamente; por lo tanto, tampoco sirven para tratar el olor o sabor del agua.

2.2.1.7. Ósmosis inversa

El sistema de ósmosis inversa es la última operación unitaria del pretratamiento del agua y está encargada de generar agua desionizada y despirogenizada. Consiste en dos membranas semipermeables de poliamida que se emplean para remover sólidos disueltos en el agua, sales, moléculas orgánicas, bacterias y endotoxinas a una alta presión.

El funcionamiento de esta operación se realiza a través de una bomba centrífuga multiestado que garantiza un suministro de agua con la presión necesaria para hacer pasar el agua a través de la membrana de ósmosis. La velocidad y empuje dado al agua son regulados por un inversor.

La membrana osmótica está contenida en una carcasa de acero inoxidable de grado AISI 316 L, a través de la cual pasa el agua suavizada con presión. El agua producida que fluye después de este proceso se denomina permeado y es la que se utilizará en la siguiente operación; sin embargo, existen varios caudales de salida, los cuales se dividen: el concentrado en parte recirculado, en parte drenado y un permeado que alcanzará a ser la alimentación del destilador. Esta operación cuenta con un 60 % de recuperación en la ósmosis; aun así, este proceso tiene uno de los mayores flujos de rechazo.

2.2.1.8. Intercambiador térmico

Un intercambiador de calor funcionará como una operación de precalentamiento del agua de ingreso al destilador y recupera en contracorriente el calor cedido al agua destilada producida y los gases no condensables que se escapan del tanque de recirculación WFI y de la cámara de condensación del condensador. Gracias a este intercambiador es posible ahorrar muchas calorías para calentar el agua de alimentación que llega al destilador ya caliente.

2.2.1.9. Destilador por termocompresión mecánica (PSMC)

El principio operativo del destilador por termocompresión mecánica modelo PSMC se basa en la evaporación de un líquido en ebullición a una temperatura de 102 - 104 °C en vacío y en el aumento sucesivo de temperatura hasta más de 100 °C del vapor, gracias a la acción mecánica de un aspirador/compresor.

El vapor que ha sido comprimido y empujado en una cámara con temperatura inferior, condensa y cede su calor de evaporación al líquido contenido en el condensador. Así, el líquido evapora en una cantidad que

corresponde al peso del vapor condensado. Este proceso permite una completa recuperación del calor latente que se usa como fuente de calentamiento para el líquido que bullirá.

Los destiladores más actuales pueden proporcionar agua pura con un alto nivel de pureza química y biológica, y que por lo tanto se puede utilizar para la preparación de soluciones inyectables. Los desarrollos técnicos le permiten a este sistema alcanzar los siguientes resultados:

- Eliminación de impurezas gaseosas del agua de alimentación
- Velocidad ascensional de vapor producido
- Prevención de arrastre del vapor
- Protección contra la contaminación

La operación de destilación se presenta como un procedimiento unificado debido a que físicamente se presenta como una gran columna sola, pero está compuesta de 3 áreas distintas:

- Cámara de condensación: es donde se condensa el vapor puro recirculado desde la cámara de evaporación cuando el fajo de tubos de la cámara de condensación que contiene el agua hirviendo sube.
- Cámara de evaporación: es donde se colecta todo el vapor producido y la separación del vapor de la parte líquida, por medio de un soplante que, en principio, succiona este vapor y luego lo sopla en la cámara de condensación.
- Soplante: se compone de un impulsor accionado por un motor con un inversor. Succiona el vapor producido en la cámara de evaporación del

destilador; luego lo comprime y lo sopla en la cámara de condensación, donde encuentra el fajo de tubos recorrido del agua que sube a una temperatura más baja y provoca su condensación.

Figura 11. **Destilador por termocompresión mecánica (PSMC)**



Fuente: GDN. *Destilador por termocompresión*. www.gdnsrl.it. Consulta: Octubre 2018.

La producción de WFI se inicia cuando la operación del soplante empieza a trabajar; este, a su vez, requiere de dos condiciones: la sonda de temperatura que reside en la tubería de entrega de la soplante misma, debe ser por lo menos alrededor de 85 °C, mientras el interruptor de presión en la cámara de evaporación debe indicar una presión adecuada para garantizar que no haya vapor que se pueda aspirar.

2.2.1.10. Tanque recolector de flujos de rechazo

Este depósito realiza la recolección de todos los flujos de rechazo que genera el sistema de producción de agua para inyección y los desvía hacia un colector que los expulsa conjuntamente en un solo caudal. Parte de estos flujos se debe a que en las inspecciones de las diferentes operaciones el agua no cumple con los requerimientos. Consecuencia de ello son los rechazos que termodinámicamente no son recuperables y están destinados al drenaje.

Este tanque rechaza agua con temperatura media, debido a que existe un ingreso de agua potable que regula la temperatura interna del recolector, entre las diferentes temperaturas de entrada a una presión atmosférica y con una caracterización distinta.

2.2.1.11. Tanque de almacenamiento WFI

El tanque de almacenamiento de agua para inyección es parte del sistema de distribución para optimizar la capacidad del equipo de producción de WFI y así mantener un suministro continuo en los puntos de uso de las áreas productivas. El tanque de almacenamiento cuenta con una camisa para vapor industrial, que permite el intercambio de temperatura del agua almacenada y mantener el *loop* de distribución entre 70 - 80 °C. Debido a que el tanque es cerrado, posee un filtro de venteo que permite mantener la presión atmosférica sin riesgo de contaminación microbiológica del agua almacenada.

2.2.1.12. Generador de vapor puro

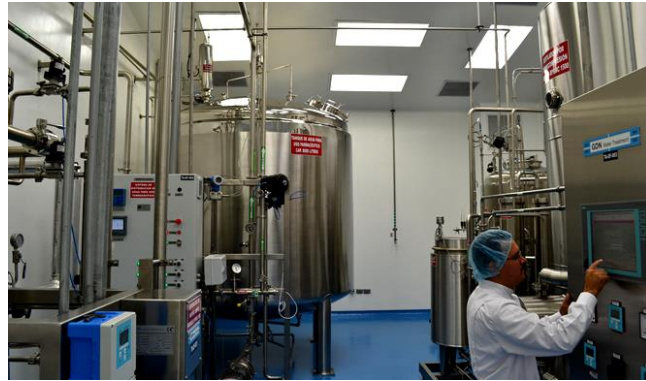
La operación de generación de vapor puro es debido a la utilización de vapor con cierto grado de pureza que permite la esterilización de equipo

necesario durante procesos productivos dentro de la planta. El principio operativo del generador de vapor puro se basa en el principio de convección térmica (movimiento convectivo o termosifón) que es una de las tres maneras para conducir el calor. El agua de alimentación entra desde la parte baja de la columna y se empuja en el intercambiador conectado a esta, donde un especial transmisor de nivel garantiza un nivel constante en la columna de evaporación.

El fluido de calentamiento entra en el lado de la carcasa del intercambiador y se recupera a través de un desvío del condensado. El fajo de tubos determina un importante movimiento convectivo del agua que alcanza rápidamente la temperatura de evaporación. El vapor producido se envía a la cámara de evaporación, cuya amplia sección determina una baja velocidad, de manera que se pueda evitar el posible arrastre de impurezas y partículas de agua no evaporada; después estas se mueven hacia la parte más baja de la columna para volver el fajo de tubos gracias a un movimiento convectivo.

Otro sistema de separación de las gotas de agua está formado por un doble separador posicionado en la parte alta de la columna, necesario para obtener un vapor puro de buena calidad. El suministro de vapor puro está controlado a través de una válvula modulante neumática activada por un transductor de presión, de manera que se permita la regulación de la salida del vapor puro según la presión requerida al interior de la cámara de ebullición.

Figura 12. **Sistema de producción de agua para inyección**



Fuente: Grupo Unipharm. *Tratamiento de agua potable*. grupounipharm.com.

Consulta: septiembre 2018.

2.3. Descripción de flujos de rechazo

Se determinó la calidad de agua con base en sus especificaciones para determinar el perfil del agua rechazada.

2.3.1. Especificaciones cualitativas del rechazo

Para conocer la calidad del agua es importante la especificación visual de la misma, la cual está determinada por ciertas características cualitativas, de las cuales tomaremos en consideración las siguientes:

- Transparencia
- Olor
- Color
- Turbiedad
- Temperatura

Estas características determinarán un perfil físico preliminar de los flujos de rechazo de agua que el sistema genera en las diferentes operaciones industriales que conlleva su producción. La realización de una serie de pruebas al agua ayudó a determinar el perfil preliminar actual de estos flujos de rechazo. A continuación, se presenta los resultados del análisis cualitativo llevado a cabo con la utilización de instrumentos como frascos y viales para la protección de las muestras y para conservar la precisión en la evaluación de cada análisis.

Figura 13. **Análisis cualitativo de agua suavizada y agua desionizada**



Fuente: elaboración propia, foto tomada en el interior de empresa farmacéutica.

Tabla I. **Resultados de análisis de pretratamiento del agua**

Aspecto	Conclusión
Olor	Sin presencia de estímulo o sensación por olor
Color	Sin presencia de aspecto coloreado
Temperatura	Un promedio de 24 °C para las diferentes muestras
Turbiedad	Agua incolora

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Figura 14. **Análisis cualitativo de agua condensada en procesos de destilación e intercambiador de calor**



Fuente: elaboración propia, foto tomada en el interior de empresa farmacéutica.

Tabla II. **Resultados de análisis de tratamiento del agua**

Aspecto	Conclusión
Olor	Sin presencia de estímulo o sensación por olor
Color	Sin presencia de aspecto coloreado
Temperatura	Un promedio de 24 °C para las diferentes muestras
Turbiedad	Agua incolora

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Figura 15. **Análisis de agua concentrada del flujo de rechazo general**



Fuente: elaboración propia, foto tomada en el interior de empresa farmacéutica.

Tabla III. **Resultados de análisis del agua general rechazada**

Aspecto	Conclusión
Olor	Sin presencia de estímulo o sensación por olor
Color	Sin presencia de aspecto coloreado
Temperatura	Un promedio de 24 °C para las diferentes muestras
Turbiedad	Agua incolora

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Los resultados denotan un sistema eficiente en su proceso productivo. La caracterización cualitativa resalta el hecho de que se trata de agua limpia en relación con su aspecto físico, a pesar de ser flujos rechazados por el sistema de producción. El agua de ingreso al sistema mantiene las especificaciones de agua potable, a pesar de que existen muchas operaciones industriales por las cuales recorre el agua, el rechazo de este proceso aún mantiene estándares de calidad con respecto a medidas cualitativas que corresponden al agua potable.

Acerca de los análisis de algunas muestras que no se representan en estos resultados, se debe aclarar que los flujos de rechazo en los tanques de reserva WFI y tanque de almacenamiento WFI se evalúan constantemente por el personal de mantenimiento en el área de inyectables y esta calidad de agua cumple con especificaciones dentro del proceso. Solamente se tomará en cuenta estos flujos en casos especiales en donde se realizará la operación de vaciado de los tanques mencionados.

2.3.2. Especificaciones cuantitativas del rechazo

Un análisis del agua un grado más específico y minucioso requiere determinar las especificaciones cuantitativas de los flujos de rechazo del sistema. Es necesario para realizar un correcto perfil del tipo de agua rechazada y de esta forma complementar el análisis anterior y continuar hacia la categorización. Si nuestro propósito es generar una oportunidad de mejora para darle utilidad a este tipo de agua rechazada, es preciso efectuar este muestreo para corroborar que el servicio o proceso externo al cual vaya dirigido este rechazo sea acorde o lo más próximo en relación a calidad y cantidad demandada para suplirla. Se debe asegurar que al reutilizarla no se ocasione daños al ecosistema y a equipos.

Debido a lo anterior, los resultados obtenidos de cada porción de agua representativa extraída y analizada en los diferentes puntos de rechazo fueron por medio de instrumentos de medición. El muestreo para este análisis fue realizado de forma simultánea al análisis cualitativo. Las especificaciones cuantitativas por considerar, son las siguientes:

- Análisis de carbono orgánico total (TOC)
- Conductividad
- Potencial de hidrógeno pH

- Total de sólidos disueltos
- Caudal

Los resultados obtenidos de este análisis se representan a través de un cuadro de resultados cuantitativos que resumen la información que durante varios días se recolectó por medio del muestreo. Posteriormente se analiza el promedio de los resultados alcanzados; esto genera una caracterización o perfil promedio que se maneja como agua de rechazo dentro del sistema. A continuación, se presenta los resultados del perfil del agua en relación con la disminución de contaminantes que claramente cada operación realiza para alcanzar el grado de agua para inyección por medio de su clasificación dentro del sistema.

2.3.2.1. Pretratamiento

El resultado del análisis en el pretratamiento deja en claro una situación importante: el equipo de ósmosis inversa es la primera operación que rechaza un flujo de agua constante que equivale a un promedio de 730 L/h. Se debe recalcar que es el caudal más alto en el sistema, sin tomar en cuenta el caudal de rechazo general del recolector, en donde se juntan todos los rechazos de agua, incluida una tubería que transporta agua potable y que baja hacia el recolector para reducir la temperatura del mismo. La ósmosis inversa proporciona un porcentaje alto de reutilización de los flujos de agua que son destinados al rechazo. La operación realiza una recirculación del agua que reingresa nuevamente a la operación de ósmosis inversa; sin este paso dentro del proceso perdería presión y aumentaría el caudal de agua rechazada. Esta operación unitaria, por su diseño y funcionamiento, genera más flujo de rechazo que las demás operaciones. Algo importante dentro de los resultados obtenidos es el comportamiento de la conductividad y del análisis de carbono orgánico total en la ósmosis. Se registra

un aumento en ambos resultados respecto a la especificación del agua en la operación anterior, suavización. La operación de ósmosis inversa es una de las que más rebaja la concentración de contaminantes presentes en el agua, para producir agua desionizada y despirogenizada. El resultado es una concentración de contaminantes que aumentan sus características de conductividad y carbono orgánico total cuando el flujo es rechazado.

Tabla IV. **Resultados de análisis cuantitativo, etapa de pretratamiento**

	Análisis de carbono orgánico total (ppb)		Conductividad (µs / cm)		Grado de acidez (pH)		Temperatura (°C)		Total de sólidos disueltos (mg/L)		Caudal (L/h)	
	Prueba	Media	Prueba	Media	Prueba	Media	Prueba	Media	Prueba	Media	Prueba	Media
Agua suavizada	184,00	125,20	216,00	214,57	7,79	7,68	27,10	22,99	129,00	128,43	N/A	Caso especial
	82,80		214,00		7,60		23,00		128,00		N/A	
	85,60		213,00		7,69		21,60		127,00		N/A	
	30,00		213,00		7,61		20,70		128,00		N/A	
	81,00		213,00		7,88		20,00		128,00		N/A	
	174,00		213,00		7,62		23,20		127,00		N/A	
	239,00		220,00		7,60		25,30		132,00		N/A	
Agua desionizada	250,00	255,57	380,00	360,14	8,09	7,87	27,10	23,47	227,00	216,29	730,00	730,00
	118,00		380,00		7,90		22,50		228,00		730,00	
	443,00		251,00		7,78		22,50		151,00		730,00	
	181,00		372,00		7,86		23,20		224,00		730,00	
	193,00		348,00		7,88		23,70		210,00		730,00	
	246,00		380,00		7,91		22,90		228,00		730,00	
	358,00		410,00		7,69		22,40		246,00		730,00	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

2.3.2.2. Tratamiento

Esta parte del sistema realiza un gran trabajo para producir agua con un grado de pureza alto que se utiliza para inyectables. Algo que destaca en estos flujos de rechazo es el hecho de que cada suboperación que forma parte del destilador tiene diferentes métodos de rechazar el agua. El destilador realiza rechazos de forma intermitente; el intercambiador, continua; el soplante, continua pero mínima. Este es el motivo por el cual se desprecia el caudal del condensado rechazado por el soplante, ya que su representación es mínima en comparación con otros caudales que desechan mayor cantidad de agua en menor tiempo.

En estos puntos de rechazo se puede observar claramente cómo el fluido que se destina para rechazo cada vez disminuye más sus especificaciones conforme pasa por cada una de las operaciones, al punto de ser agua con calidad muy pura, aun siendo agua de rechazo. En relación con la conductividad, hasta que llega al tanque de agua de reserva que tiene $0,4 \mu\text{S}/\text{cm}$, se rebajó aproximadamente el 99,8 % de su concentración, desde el ingreso como agua suavizada, la cual tiene $214 \mu\text{S}/\text{cm}$.

En el análisis de carbono orgánico total hay datos que muestran valores negativos. En estos puntos se repitió la toma de muestras y se consideró el cuidado de las buenas prácticas de manufactura para realizarlo. Puede considerarse estos resultados por dos motivos, debido al punto de análisis, ya que se trata de una combinación de concentrado y gases incondensables. Otra opción es considerar que el analizador TOC utilizado; fue el mismo con las demás muestras, pero el proceso de medición de dióxido de carbono generado por la oxidación de los compuestos presentes en el agua, fue medida erróneamente por la membrana que se encuentra en su interior.

Tabla V. **Resultados de análisis cuantitativo, etapa de tratamiento**

	Análisis de carbono orgánico total (ppb)	Conductividad (µs / cm)	Grado de acidez (Ph)	Temperatura (°C)	Total de sólidos disueltos (mg / L)	Caudal (L/h)						
Concentrado de termocompresor	0,72	64,10	57,69	9,74	26,20	38,00	15,00					
	0,75							55,70	9,81	25,10	33,00	15,60
	-2,15							55,00	9,81	25,50	34,00	9,60
	-13,80							56,30	9,73	25,60	34,00	14,40
	0,89							55,70	9,84	26,00	34,00	29,40
	0,87							57,50	9,58	26,60	35,00	10,80
	0,64							59,50	9,73	24,30	37,00	27,00
Condensado de soplante	61,10	1,10	1,34	5,76	23,10	1,00	N/A					
	30,40							0,70	6,80	20,60	0,00	N/A
	83,30							0,80	7,83	22,30	0,00	N/A
	101,00							2,70	7,50	22,30	2,00	N/A
	25,70							0,90	7,60	24,00	1,00	N/A
	35,10							0,70	7,73	23,00	0,00	N/A
	15,90							2,50	6,23	22,60	2,00	N/A
Condensado de intercambiador	36,00	1,90	2,49	5,43	24,60	1,00	42,00					
	-49,20							2,60	5,76	22,60	2,00	40,20
	-17,50							1,70	6,40	24,20	1,00	42,00
	-9,43							2,20	5,89	24,00	1,00	42,00
	-17,90							3,40	5,23	26,40	2,00	48,00
	13,90							2,40	5,77	23,90	1,00	39,00
	5,75							3,20	5,66	22,50	2,00	42,00
Tanque reserva	10,20	0,40	0,40	6,25	25,00	0,00	N/A					
	23,30							0,32	6,46	25,00	0,00	N/A
	7,88							0,52	6,40	25,00	0,00	N/A
	3,51							0,56	6,16	25,00	0,00	N/A
	13,90							0,27	6,15	25,00	0,00	N/A
	22,20							0,35	6,40	25,00	0,00	N/A
	9,27							0,35	6,25	25,00	0,00	N/A
-1,73		57,69		9,75		25,61		35,00		17,40		
50,36		1,34		7,06		22,56		0,86		Caso especial		
-5,48		2,49		5,73		24,03		1,43		42,17		
12,89		0,40		6,30		25,00		0,00		Caso especial		

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

2.3.2.3. Almacenamiento

En relación con los valores de caudal, en estas operaciones no existe un flujo de rechazo continuo; más bien existe flujo de rechazo cuando se trata de casos especiales en donde el agua no esté cumpliendo con las especificaciones o que se realice un mantenimiento a los tanques de almacenamiento. Es un tema que se mencionó con el tanque de reserva WFI y el tanque de almacenamiento WFI, ya que estos se evalúan constantemente por el personal de mantenimiento para mantener las especificaciones controladas. El propósito del análisis en la etapa de almacenamiento consiste en tener un valor promedio aproximado del perfil del agua que contiene el tanque de almacenamiento y posterior distribución a los puntos de uso.

Tabla VI. **Resultados de análisis cuantitativo, almacenamiento**

	Análisis de carbono orgánico total (ppb)	Conductividad (µs / cm)	Grado de acidez (Ph)	Temperatura (°C)	Total de sólidos disueltos (mg / L)	Caudal (L/h)
Tanque de almacenamiento	12,60	0,36	6,10	25,00	0,00	N/A
	10,50	0,33	6,34	25,00	0,00	N/A
	18,80	0,37	6,35	25,00	0,00	N/A
	21,70	0,20	6,30	25,00	0,00	N/A
	13,10	0,36	6,33	25,00	0,00	N/A
	13,10	0,44	6,35	25,00	0,00	N/A
	27,60	0,58	6,46	25,00	0,00	N/A
		16,77	0,38	6,32	25,00	0,00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

2.3.2.4. Rechazo general

Esta fracción del sistema forma parte de la oportunidad de mejora. El recolector que se ubica en esta área recolecta todos los flujos de rechazo que genera cada punto del sistema; es decir, que este flujo de agua rechazada es un concentrado de todo lo que el sistema considera que no está acorde con las especificaciones de agua para inyección.

El resultado de este análisis muestra que el agua en este punto sobrepasa el nivel neutro de pH, para empezar a convertirse en agua alcalina. En relación con la conductividad, los valores obtenidos sobrepasan a la cantidad ingresada como agua suavizada, que tiene un valor de 214 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sobrepasa también el valor de conductividad, que se mantiene aproximadamente constante de agua potable en la planta, con un valor de 220 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Esta operación, al realizar la recolección de cada uno de los flujos de rechazo, tiene obviamente un caudal mayor. En teoría es la suma de cada uno de estos flujos por separado, tomando en cuenta el aspersor que genera un caudal extra con especificaciones de agua potable, ya mencionado. Esta es una razón más del porqué existe un aumento de los resultados fisicoquímicos.

Tabla VII. **Resultado de análisis cuantitativo de tanque recolector**

	Análisis carbono orgánico total (ppb)	Conductividad (µs / cm)	Grado de acidez (Ph)	Temperatura (°C)	Total de sólidos disueltos (mg / L)	Caudal (L/h)
Rechazo general	227,00	305,00	7,85	23,00	184,00	960,00
	114,00	333,00	7,78	22,20	200,00	882,00
	199,00	212,00	7,85	21,30	128,00	1 140,00
	917,00	322,00	7,82	22,70	194,00	1 200,00
	130,00	203,00	7,87	25,60	122,00	3 240,00
	873,00	278,00	8,15	22,00	168,00	1 200,00
	314,00	336,00	7,80	23,10	201,00	960,00
	396,29	284,14	7,87	22,84	171,00	1 368,86

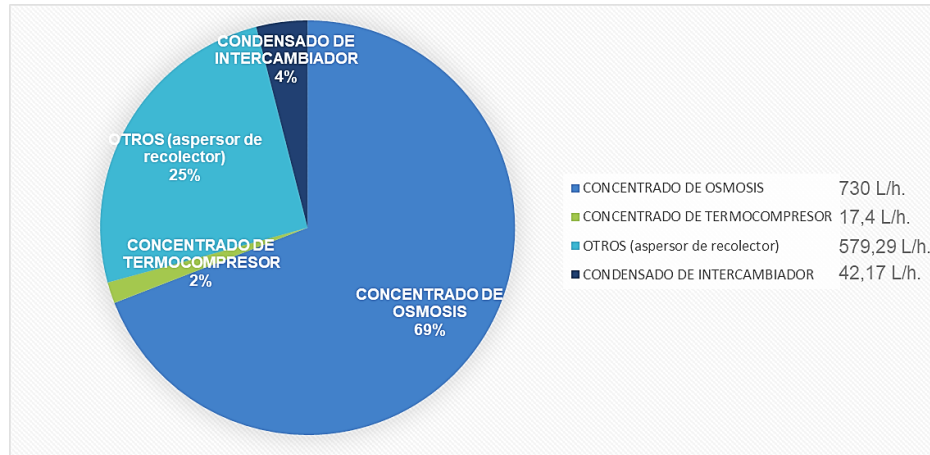
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

2.3.3. Análisis de resultados e interpretación

Se ha observado que existen diferentes especificaciones dentro de los flujos de rechazo involucrados para la oportunidad de mejora. Es importante resaltar el resultado de los flujos de rechazo más importantes y dominantes dentro de ellos, ya que de esta forma podremos aprovechar el 100 % de este rechazo, lo que sería ideal para el proyecto.

Por lo tanto, se presenta un gráfico que muestra el nivel de participación por caudal de cada punto de rechazo. Se toma en cuenta el valor de agua consumida por el aspersor del tanque recolector.

Figura 16. **Porcentaje de participación en el flujo general de rechazo**



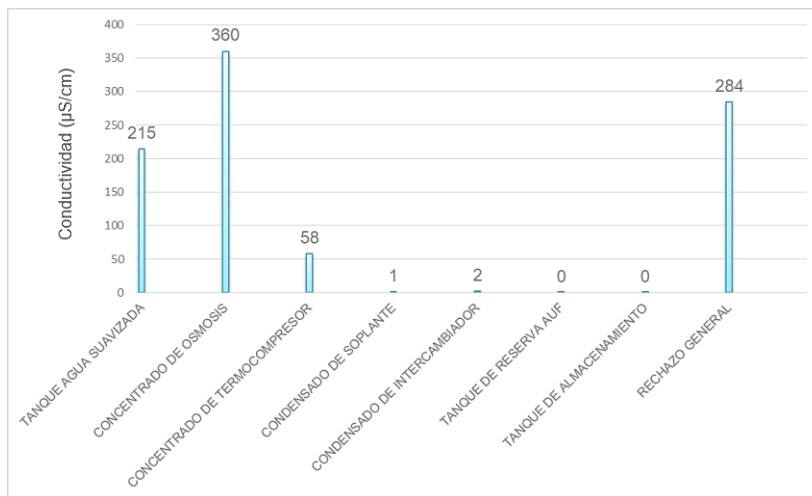
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En torno a los valores de caudal se puede concluir lo planteado anteriormente acerca del flujo rechazado por la ósmosis inversa. Este caudal representa el mayor porcentaje de rechazo del sistema, que anteriormente en la figura 16 se determinó que se trataba del 69 % de los rechazos totales. La participación de esta operación es con un valor de caudal de 730 L/h. El caudal en segunda posición es de agua potable que cae al tanque recolector por medio de aspersor que enfría el tanque debido a los flujos de rechazo del destilador e intercambiador.

A raíz de esta comparación de caudales, se empieza a considerar que si recuperamos todo el caudal de rechazo podría aprovecharse en un servicio externo y representa una buena oportunidad de mejora. Sin embargo, si solo se recuperara el caudal de rechazo en la operación de ósmosis, también representaría una buena oportunidad de mejora, ya que en teoría representa alrededor del 69 % del porcentaje rechazado. El inconveniente tendría lugar

debido a las especificaciones que tiene en promedio el flujo de rechazo, por lo que se mencionaba anteriormente en relación al aumento de contaminación en el perfil del flujo rechazado. Correspondería entonces a la verificación de la categorización de este flujo como siguiente etapa, ya que representa una oportunidad notable.

Figura 17. **Valores de conductividad en puntos de rechazo**

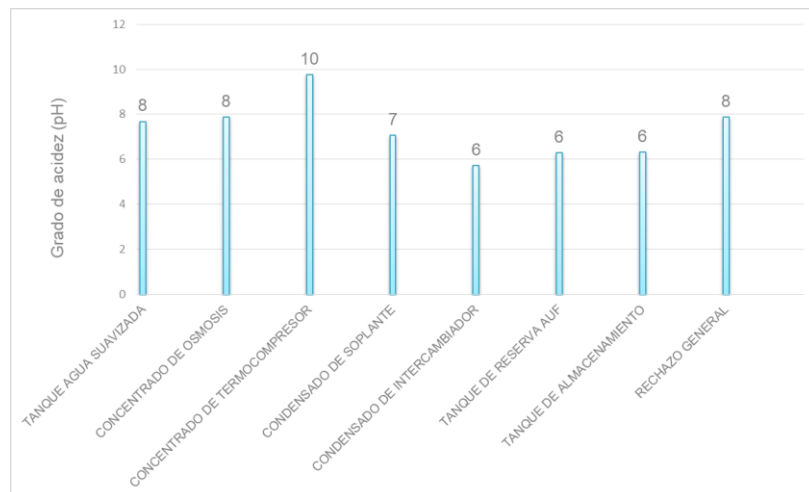


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La figura 17, sobre la conductividad en cada operación, se demuestra cómo el sistema realiza la descontaminación del agua con respecto a la característica de conductividad con una tendencia bajista. Se conoce que este proceso requiere remover del agua esos contaminantes que la USP demanda. Del movimiento de conductividad en cada uno, solamente el concentrado de ósmosis es el valor más alto de todos ellos, y aun así no rebasa el límite mínimo admisible de especificaciones para agua potable que establece la COGUANOR en la figura 5.

La figura 18, sobre el potencial de hidrógeno que presenta el agua, permite observar que desde el ingreso a los suavizadores se trata de agua que sobrepasa la neutralidad para ser alcalina; el valor más alto del pH es en la etapa de precalentamiento con un valor de 10, en donde encontramos al intercambiador de calor. En esta etapa hubo variaciones con el error del análisis de TOC; es un rechazo con características alcalinas que sobrepasa incluso los límites máximos permisibles que la COGUANOR demanda para que esta sea agua consumible por el ser humano, en caso de que se fuera a utilizar solamente con este fin. El resultado de pH en el flujo de rechazo general, ya que en este punto vuelve nuevamente a descender el valor a 8. Nuevamente, este valor sí alcanza las especificaciones de la COGUANOR. En términos máximos permisibles de la norma, esto quiere decir que se debería monitorear constantemente para que no exista una elevación súbita de este valor y cause daños, o implementar una operación para reducirlo y mantenerlo en el límite mínimo aceptable.

Figura 18. **Valores de potencial de hidrógeno en puntos de rechazo**

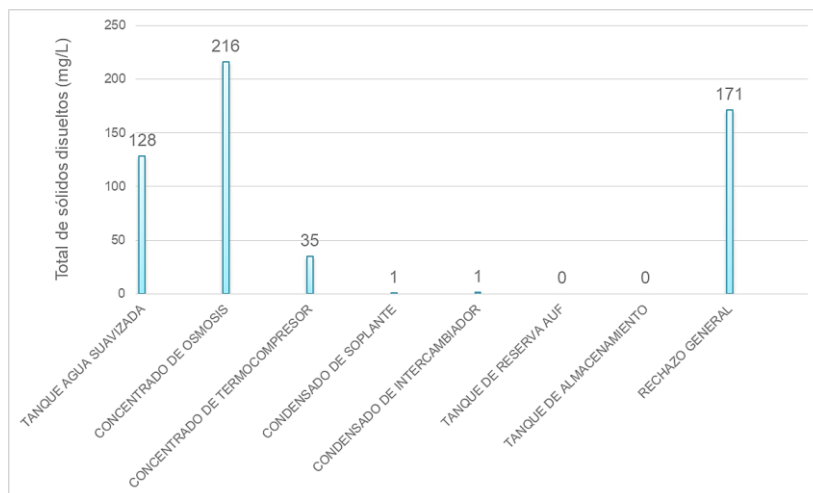


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la figura 19 se disponen los resultados del total de sólidos disueltos para cada punto de flujo de rechazo del sistema. Esto indica que cada etapa por la que pasa el agua para ser tratada disminuye el total de sólidos disueltos de forma abrupta. Esto implica que, al ser desechada por el drenaje, la característica del flujo general de rechazo considera una disminución de esta variable en específico. En esta característica no existe problema alguno con el cumplimiento de la COGUANOR, ya que ninguno de los valores siguientes sobrepasa el límite mínimo admisible que debe tener el agua potable para consumo.

En las últimas etapas se puede observar que el valor para esta variable se vuelve 0; no es que dejen de existir sólidos disueltos en el agua analizada; más bien el valor es muy bajo en torno a centésimas que se vuelve despreciable.

Figura 19. **Valores de total de sólidos disueltos en puntos de rechazo**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

2.3.4. Categorización

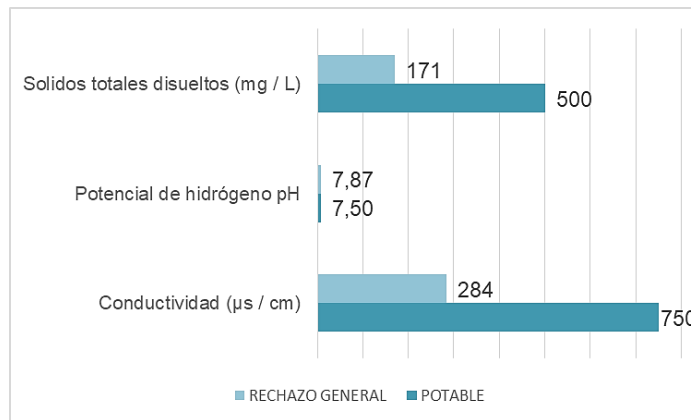
En esta etapa del proyecto se desea categorizar el agua de rechazo, de la que en los apartados anteriores se ha realizado un perfil tanto histórico como a nivel fisicoquímico. En este punto de la investigación se tomarán las siguientes tres operaciones que generan flujos de rechazo significativos y a partir de estos generar una oportunidad.

- Recolector de flujos de rechazo
- Ósmosis inversa
- Destilador por termocompresión
- Intercambiador de calor

Estas operaciones generan flujos de rechazo que representan y cambian las características del agua que sale con destino al drenaje. A partir de ellas se realizará un análisis en donde se comparará la caracterización del agua potable que demanda la COGUANOR con respecto al punto de rechazo en cuestión.

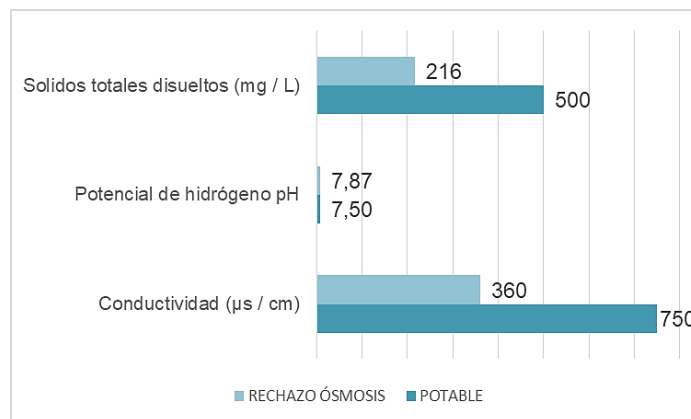
Esto se debe a que sin importar el lugar de destino donde se envíen los flujos de rechazo, ya sea dentro de la planta de producción o fuera de ella, existe el riesgo de que en algún momento esta pueda ser destinada a otro servicio o consumida por algún colaborador dentro de la planta o externa a ella. En la planta de Villa Nueva, a partir del agua potable extraída del pozo, como especificaciones mínimas debe tener calidad potable para ser enviada a cada área que necesite agua, independientemente de su actividad productiva. Cada área partirá de agua potable como materia prima para desarrollar agua desmineralizada, purificada, para inyección, servicios sanitarios, regado de jardines, entre otros. El mínimo común en cada proceso es la utilización de agua potable en cada una de ellos.

Figura 20. **Caracterización del agua potable comparada con el flujo de rechazo general del sistema**



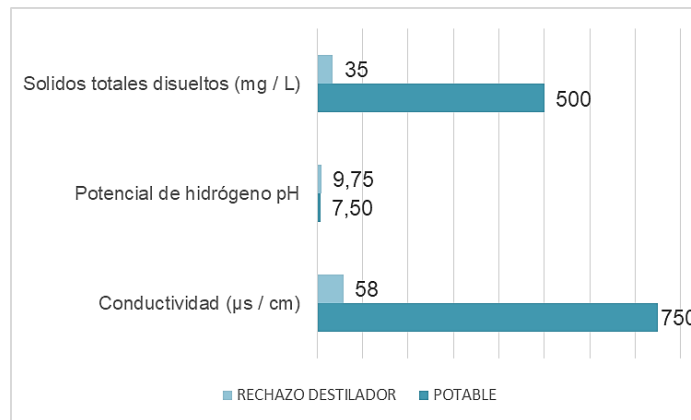
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 21. **Caracterización del agua potable comparada con el flujo de rechazo en ósmosis inversa**



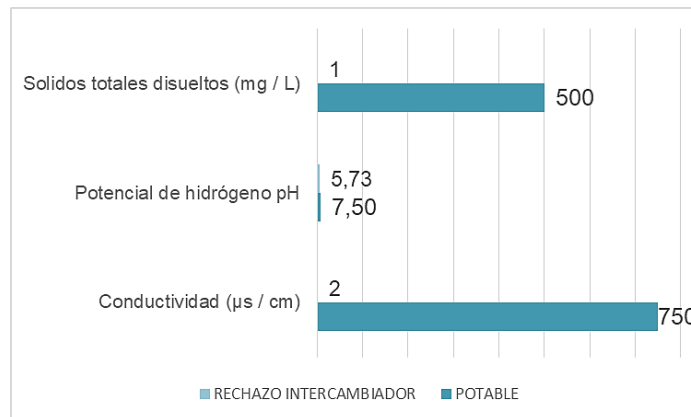
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 22. **Caracterización del agua potable comparada con el flujo de rechazo por destilador por termocompresión**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 23. **Caracterización del agua potable comparada con el flujo de rechazo del intercambiador de calor DTS**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

El motivo de esta comparación es la verificación previa del tratamiento que conllevará cada flujo en los diferentes puntos de rechazo para volverla potable. Los resultados son satisfactorios en relación con cada una de estas comparaciones; si tomamos el flujo de rechazo general se puede ver que la única característica para mejorar es la del potencial de hidrógeno.

2.3.5. Consideraciones para muestreo

Es necesario remover en mayor o menor grado los contaminantes del agua potable, dependiendo de la calidad del agua que se desee producir. Por lo tanto, se emplean diferentes sistemas para purificarla y alcanzar los estándares de agua para inyección. En algunas operaciones del sistema de producción de WFI se genera flujos de rechazo de agua que son destinados al drenaje; principalmente tiene que ver con el diseño del sistema, la configuración y el ciclo de trabajo para la obtención de agua para inyección.

Los flujos de rechazo son debido a que existen normas que establecen los parámetros de especificaciones en las que se debe mantener los resultados de los análisis del agua, para su posterior utilización en procesos que requieran esta materia prima. La caracterización de los flujos de agua rechazada dependerá en gran parte del tipo de etapa que se esté ejecute y de la cual se generen rechazos. Por ejemplo, en la etapa de desionización del agua habrá rechazos con características contrarias a las que debe tener el agua desionizada y despirogenizada. Una caracterización de los diferentes flujos de rechazo que el sistema contempla será importante para la realización del proyecto. A partir de lo mencionado, se tomará en cuenta distintos puntos importantes que se consideran pertinentes realizar para vislumbrar un panorama amplio del proyecto por realizar.

2.3.6. Delimitación de puntos de rechazo en el sistema de producción WFI

Se determinó los siguientes puntos que generan flujo de rechazo en el sistema de forma constante, intermitente o de forma especial, dependiendo de la operación en la que se encuentre el sistema en un momento determinado. A partir de estas operaciones el agua es rechazada, no es aprovechada en ningún otro proceso o servicio y va dirigida hacia el drenaje. Los puntos de rechazo por considerar en el sistema WFI son los siguientes:

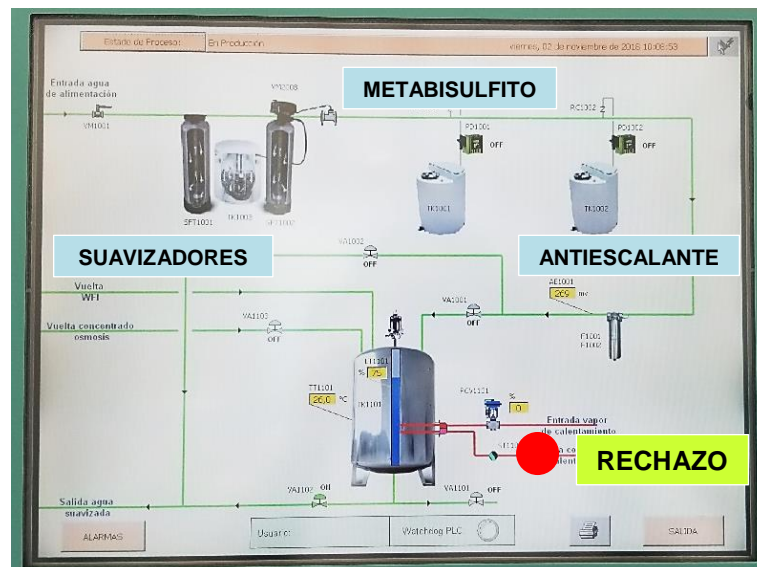
- Pretratamiento
 - Tanque de agua suavizada
 - Ósmosis inversa
- Tratamiento
 - Intercambiador de calor
 - Destilador por termocompresión
 - Soplante
 - Tanque de reserva WFI
- Almacenamiento
 - Tanque de 8 000 L
- Colector
 - Tanque recolector de flujos de rechazo

A partir de los puntos anteriores se representará de forma gráfica, los puntos de extracción de muestras, a través de la pantalla digital del sistema en el modo

de sinóptico. En estos puntos se recolectará las muestras para su posterior análisis fisicoquímico. Para la realización de este muestreo se tomó en cuenta las buenas prácticas de manufactura que correspondan al área, para evitar contaminación y que en cada parámetro no exista variabilidad que pueda denotar cambios en los resultados. Adicionalmente, la toma de las muestras en cada uno de los puntos de rechazo se realizó en un horario aproximado de 9:00 de la mañana los días lunes, miércoles y viernes.

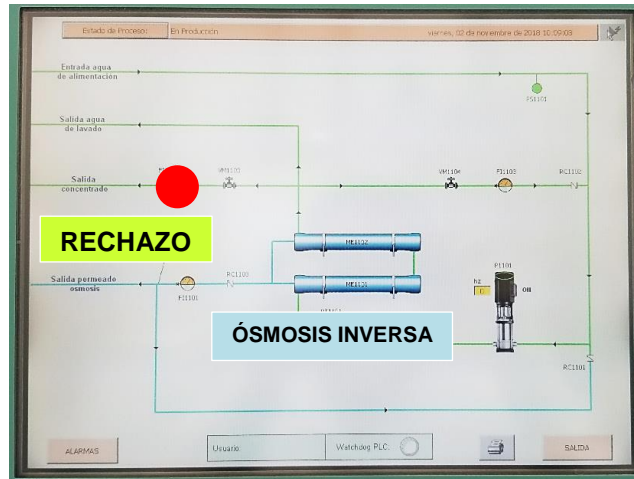
Se considera la variabilidad por diferentes circunstancias en algunas anotaciones, en los resultados puede reflejarse estos acontecimientos. Sin embargo, se tomará las medidas necesarias a partir de las buenas prácticas de manufactura antes mencionadas, para tener resultados promedios confiables que puedan detallar las características cuantitativas de los flujos de rechazo que son necesarios para esta investigación.

Figura 24. Sinóptico de pretratamiento, agua suavizada



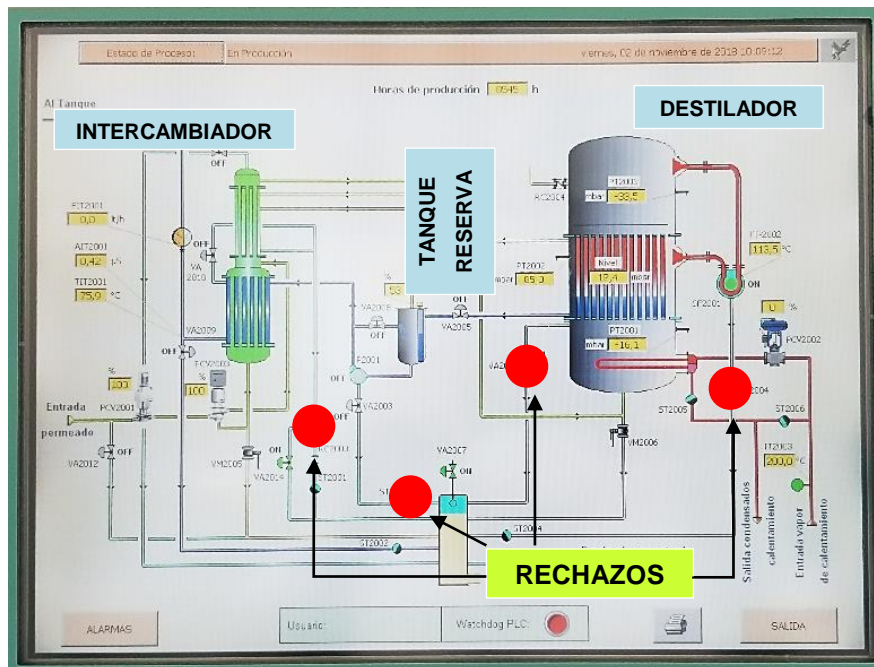
Fuente: elaboración propia, foto tomada en el interior de empresa farmacéutica.

Figura 25. Sinóptico de pretratamiento, agua desionizada



Fuente: elaboración propia, foto tomada en el interior de empresa farmacéutica.

Figura 26. Sinóptico de tratamiento, agua para inyección



Fuente: elaboración propia, foto tomada en el interior de empresa farmacéutica.

Figura 27. **Sinóptico de almacenamiento, agua para inyección**



Fuente: elaboración propia, foto tomada en el interior de empresa farmacéutica.

2.3.7. **Motivos de puntos de rechazo**

La delimitación de estos puntos de rechazo se realizó a partir de situaciones específicas que se enumeran a continuación:

- Pretratamiento
 - Incumplimiento de especificaciones en producción
 - Sanitización térmica de ósmosis inversa
 - Sanitización térmica de termocompresor
 - Operación de llenado de termocompresor
 - Operación de vaciado de tanque de agua suavizada

- Tratamiento
 - Incumplimiento de especificaciones en producción
 - Sanitización térmica de ósmosis inversa
 - Sanitización térmica de termocompresor
 - Operación de vaciado de tanque de reserva WFI

- Tanque de almacenamiento
 - Incumplimiento de especificaciones en distribución
 - Calibración de equipo
 - Mantenimiento del tanque 8 000 L

2.3.8. Recopilación de datos

A causa de este tipo de análisis que se requiere integrar para el muestreo y evaluación de los puntos de rechazo, se diseñó un cuadro de anotaciones para tomar los datos de las muestras analizadas y documentar cada día los resultados de los distintos puntos de rechazo considerados. Este formato recopila los datos de carácter cuantitativo, por lo que el análisis cualitativo se realiza conforme análisis físico. El documento para evaluación de resultados se muestra a continuación:

Tabla VIII. Cuadro de resultados para muestreo

Análisis de especificaciones en puntos de rechazo (sistema WFI)							
Fecha:	Análisis de carbono orgánico total (TOC)	Conductividad (µs / cm)	Grado de acidez (Ph)	Temperatura (°C)	Total de solidos disueltos (TDS)	Caudal (L/h)	
No.:							
Pretratamiento	Tanque de agua suavizada						
	Rechazo de ósmosis						
Tratamiento	Condensado de intercambiador						
	Tanque de reserva WFI						
	Rechazo de termocompresor						
	Condensado de soplante						
Tanque	Almacenamiento WFI						
	Rechazo general						
Observaciones:							

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

2.4. Control estadístico

Se analizó el funcionamiento del sistema WFI para cuantificar su rendimiento en años pasados y determinar un flujo de rechazo a futuro.

2.4.1. Análisis histórico de funcionamiento

Durante el año 2015 se utilizó un total de 1 180,5 m³ de agua para inyección dentro de la planta en Villa Nueva. En promedio, al mes se utilizó alrededor de 98,4 m³ de este tipo de calidad de agua en el área de inyectables. Si realizamos una proyección de producción en torno a un intervalo diario, se utilizó alrededor de 3,9 m³/día de esta calidad de agua. Ese mismo año, el rendimiento del equipo fue de un 63 %, gracias a un estudio realizado en el mismo año durante los primeros meses de uso del sistema, considerando que la producción teórica óptima del sistema es de 1,5 m³/h. En un principio, la carga de producción era muy pequeña con respecto al consumo y capacidad del equipo ese año en los primeros meses. Como se puede ver en la tabla IX, la producción de esos primeros meses era muy pequeña en consideración con los meses de agosto y octubre, los cuales tuvieron una carga más grande de producción de agua.

Se contempla la producción de agua desmineralizada en los resultados de este análisis debido a que el valor de consumo que se registra en cada mes está dado por un mismo contador que provee agua a estos dos sistemas. Estos no producen agua continuamente, más bien depende de la demanda de producción del área de inyectables. Por ello se observa este tipo de resultado en el consumo, tomando en consideración la planta adyacente de agua grado desmineralizada.

Se sabe que el consumo de agua es considerable para cada sistema, pero se debe definir cómo es el comportamiento de cada uno con respecto al aprovechamiento del agua potable consumida. En ese año no se contaba con una especificación de cuáles eran los rechazos en torno a cada sistema. De forma conjunta se determinó el aprovechamiento de agua potable del sistema; es decir, del total consumido de agua potable por ambos sistemas, cuánto de ello se aprovechaba y convertía en agua con especificaciones de grado desmineralizada y para inyección; también cuánto de esta agua potable era rechazada por medio de flujos destinados al drenaje.

Tabla IX. **Histórico de producción de WFI comparado al consumo de agua potable, año 2015**

Sector	Consumo de agua potable (m ³)	Producción (m ³)	
Mes	Planta de agua	Agua desmineralizada	Agua para inyección
Enero	362,70	158,00	60,19
Febrero	534,50	142,00	91,95
Marzo	570,50	115,00	111,29
Abril	535,00	136,00	123,31
Mayo	500,40	125,00	91,50
Junio	604,70	138,00	116,10
Julio	548,50	93,00	118,00
Agosto	618,50	166,00	126,22
Septiembre	610,90	135,00	113,14
Octubre	805,10	177,00	130,14
Noviembre	537,50	182,00	65,89
Diciembre	316,70	106,00	32,78
Totales	6 545,00	1 673,00	1 180,49

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

A partir de estos datos, se encontró que del consumo de agua potable, en promedio solo el 44 % se aprovechó durante el año 2015 para producir agua con especificaciones de agua desmineralizada o bien agua para inyección (tabla X).

Tabla X. **Análisis histórico del aprovechamiento de los sistemas de tratamiento de agua, año 2015**

Mes	Agua aprovechada (m³)	Porcentaje de aprovechamiento	Rechazo (m³)
Enero	218,19	60 %	144,51
Febrero	233,95	44 %	300,55
Marzo	226,29	40 %	344,21
Abril	259,31	48 %	275,69
Mayo	216,50	43 %	283,91
Junio	254,10	42 %	350,60
Julio	211,00	38 %	337,51
Agosto	292,22	47 %	326,28
Septiembre	248,14	41 %	362,76
Octubre	307,14	38 %	497,96
Noviembre	247,89	46 %	289,61
Diciembre	138,78	44 %	177,92
Totales	2 853,49	44 %	3 691,51

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Es decir, del ingreso total de agua potable se estaba aprovechando menos de la mitad, lo que lleva a pensar en la cantidad de rechazo que esto conlleva por parte de los dos sistemas. Corresponde a un valor de 3 691,5 m³ de agua que fueron desechados al drenaje, ya sea por incumplimiento de especificaciones, por sanitización del equipo o situaciones especiales que determinaron que esta cantidad de agua se desechara por medio de ambos sistemas.

Es una cantidad muy grande de agua rechazada que debe considerarse para aprovecharla. Claramente no será de forma completa porque se ven implicados dos sistemas en este análisis. Sin embargo, el porcentaje de recuperación que corresponda puede ser significativo, como se veía en el rechazo de ósmosis inversa. El consumo de las demás áreas dentro de la planta puede ser significativo en el año 2015 con relación a los rechazos, por ende, representa una oportunidad de mejora. Es por ello que se presenta la siguiente tabla con los resultados de consumos:

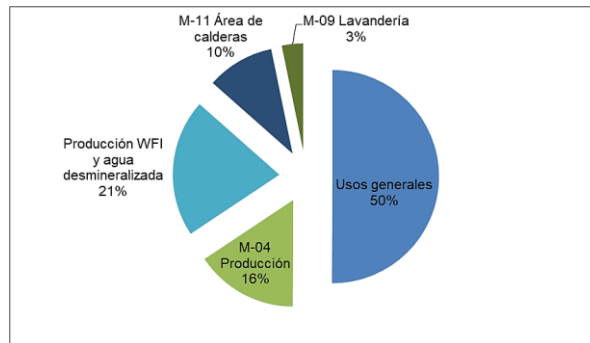
Tabla XI. **Análisis de consumo de agua potable por áreas**

Consumo de agua potable por departamento 2015 (m³)				
Usos generales	Producción (M-04)	Producción WFI y agua desmineralizada	Área de calderas (M-11)	Lavandería (M-09)
15 710,80	4 884,50	6 545,00	3 217,70	1 011,00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Este resultado indica que el área con más consumo de agua es la de usos generales. En esta área se toma en consideración varios servicios, incluido el transporte de agua hacia otra planta. Por lo tanto, tomaremos como el área de producción de WFI y agua desmineralizada el área que más agua consume, y como vimos anteriormente un área que desaprovecha un valor aproximado del 55 %.

Figura 28. Consumo de agua por departamento, año 2015



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

El análisis de estos datos demuestra que el rechazo de ambos sistemas representa más del consumo anual del área de calderas en el año mencionado. Claramente, el agua de rechazo por su especificación no puede ser utilizada en el mismo proceso; es entonces donde se puede presentar una oportunidad de mejora, ya que a través de operaciones y etapas de limpieza y caracterización del agua pueden mejorar su estándar para adaptarla a un área en concreto.

Figura 29. Producción por hora de destilador en sistema WFI, año 2017

Hora		Fecha: 13/03/2017							
Inicio	Final	Producción AUF/LPH	Consumo Agua Potable/LPH	Descarte en Producción/LPH	% de Utilización de Agua Potable en Producción	% de Descarte en producción	Rechazo Osmosis LPH	Rechazo Destilador LPH	
10:30	11:34	260	1200	940	22%	78%	730	210	
11:34	12:34	604	1600	996	38%	62%	730	266	
12:34	13:36	596	1600	1004	37%	63%	730	274	
13:36	14:36	613	1600	987	38%	62%	730	257	
14:36	15:36	637	1700	1063	37%	63%	730	333	
15:36	16:36	605	1700	1095	36%	64%	730	365	
16:36	17:36	605	1600	995	38%	62%	730	265	
17:36	18:36	600	1600	1000	38%	63%	730	270	
PROMEDIO		609	1629	1020	37%	63%	730	290	

Rendimiento del equipo: Promedio LPH/Capacidad del Equipo LPH (609/1500)
 Rendimiento del equipo: **41%**
 Tiempo para producir 8000 litros de AUF: 13.1 Horas

Fuente: empresa farmacéutica, departamento de tratamiento de aguas.

En la figura 29 se representa la relación conforme el rendimiento del equipo en una fecha actual. Se trata de un estudio que se realizó internamente en la empresa el año 2017 en el mes de marzo, con el propósito de determinar el rendimiento del equipo. Este dio un valor del 41 % para ese año, lo que significó una baja de su rendimiento en comparación al año 2015 que representó más del 50 %. Volvemos a observar el hecho de que el aprovechamiento es mínimo, con un valor que se eleva al 37 %, por lo que el rechazo del proceso es el complemento, un 63 % de rechazo que va directamente al drenaje. Sin embargo, es imperativo ver el comportamiento de estas últimas fechas para analizar esos resultados y realizar una comparación de cómo está el sistema actualmente con respecto al año de su adquisición, 2015.

Tabla XII. **Análisis histórico de aprovechamiento de producción WFI en comparación al consumo de agua potable, año 2018**

Sector	Consumo agua potable (m ³)	Producción (m ³)	
Mes	Planta de agua	Agua desmineralizada	Agua para inyección
Enero	643,70	133,00	137,47
Febrero	514,80	97,00	109,06
Marzo	519,20	137,00	104,30
Abril	604,10	150,00	110,92
Mayo	832,40	257,00	165,84
Junio	916,60	229,00	138,23
Julio	1 064,00	285,00	152,17
Agosto	915,20	196,00	155,07
Septiembre	1 090,00	238,00	127,08
Octubre	1 081,50	229,00	142,73
Totales	8 181,50	1 951,00	1 342,87

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Los resultados obtenidos en lo que va del año 2018 se presentan en la tabla XII. El dato de consumo de agua ha sobrepasado al valor de consumo del año 2015 por poco más de 1 500 de m³ de agua y aún faltan dos meses de registro para finalizar el año 2018. Esto indica un claro aumento en la demanda de agua para inyección; ahora bien, si el consumo de agua potable se elevó, así mismo los flujos de rechazo que este sistema genera, lo que representa algo normal para este tipo de tratamiento pero que se debe considerar para realizar en el futuro alguna mejora o modificación. La diferencia del año 2015 al 2018 con respecto a la producción de agua para inyección son 162,4 m³ de diferencia.

Tabla XIII. **Histórico de aprovechamiento de producción WFI, año 2018**

Mes	Agua aprovechada (m³)	Porcentaje de aprovechamiento	Rechazo (m³)
Enero	270,47	42 %	373,24
Febrero	206,06	40 %	308,74
Marzo	241,30	46 %	277,90
Abril	260,92	43 %	343,18
Mayo	422,84	51 %	409,56
Junio	367,23	40 %	549,37
Julio	437,17	41 %	626,83
Agosto	351,07	38 %	564,13
Septiembre	365,08	33 %	724,92
Octubre	371,73	34 %	709,77
Totales	3 293,87	41 %	4 887,63

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

El porcentaje de aprovechamiento promedio del año 2018 es mayor en relación al análisis del año 2017 que se realizó internamente. Claramente hay meses que tienen un rendimiento mayor a otros; indistintamente de ese valor, en promedio se puede decir que mantiene este valor de aprovechamiento en 41 %.

A partir de este resultado, se ve cuánto ha sido la variación en relación al consumo de agua realizado por área en la planta de Villa Nueva.

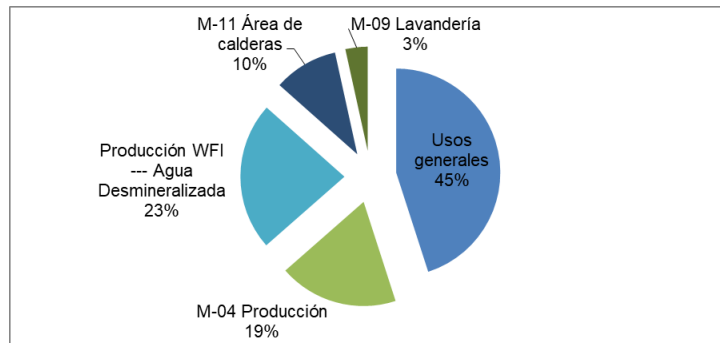
Tabla XIV. **Análisis de consumo de agua potable por área**

Consumo de agua potable por departamento 2018 (m³)				
Usos generales	Producción (M-04)	Producción WFI y agua desmineralizada	Área de calderas (M-11)	Lavandería (M-09)
16,014	6,587	8,182	3,559	1,226

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En relación con el consumo por área, específicamente al área de calderas, el aumento en relación al año 2015 es de 341 m³ de agua. Esto indica que sí existe una correlación de aumento, tanto en el consumo de agua potable para inyección como en las diferentes áreas, tomando en cuenta que los datos del año 2018 aún no están completos y falta más consumo para cada área. Se observa de mejor forma el consumo de agua a través de la siguiente representación, en donde la relación de consumo se mantiene en promedio. Existen ligeras variaciones en aumento de unas áreas como M-04 producción y producción de WFI.

Figura 30. Consumo de agua parcial por área, año 2018



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Como observación importante, el consumo de algunas áreas podría ser suplido con bastante facilidad por el rechazo que genera el sistema. Es interesante analizar el dato de todos estos años que han transcurrido y cómo se ha comportado el sistema en cada uno de ellos. Para ejecutar ese análisis se presenta la tabla XV, un resumen de los datos históricos archivados.

Con base en las imágenes anteriores, se pueden analizar varios aspectos importantes: el hecho de que la suma del consumo del área de calderas en estos últimos años ha sido menor al rechazo de todos los años anteriores mencionados, tomando en cuenta que el rechazo contempla tanto el agua desmineralizada, como el agua para inyección. Se puede suponer que podría suplir esta área solo con el agua de rechazo que se ha ido al drenaje, y con esto el consumo de agua potable que viene del pozo se reduciría mínimo en un 10 %, que es lo que muestra la figura 30. De esta misma forma se podría suplir el consumo del área de lavandería, ya que la suma de su consumo representa un poco más de 1/3 del rechazo.

Tabla XV. **Aprovechamiento histórico del sistema WFI año 2015 - 2018**

Aprovechamiento histórico del equipo de producción WFI (m³)						
	Planta de agua	Agua desmineralizada	Agua para inyección	Agua aprovechada	Porcentaje de agua aprovechada	Rechazo
Total 2015	6 545	1 673	1 180	2 853	44 %	3 692
Total 2016	7 365	2 087	1 108	3 195	45 %	4 170
Total 2017	10 682	2 701	1 311	4 012	38 %	6 670
Total 2018	8 182	1 951	1 343	3 294	41 %	4 888

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Algo importante es que el año 2017 se realizó un consumo de agua mayor al de los anteriores e incluso al total parcial del año 2018, que no aparenta subir más allá de 42 m³ de agua consumidos. También en el año 2017, según histórico de aprovechamiento, es uno de los años más bajos en lo que a aprovechamiento del agua se refiere; es decir, que se realizó un consumo de agua mayor que otros años y su aprovechamiento fue menor, por lo que generó el año con más metros cúbicos de agua rechazada, con un valor de 6 670 m³.

Tabla XVI. **Consumo de agua potable por área, año 2015 - 2018**

	Consumo de agua potable por departamento (m³)					
	Uso general	Producción (M-04)	Producción WFI y agua desmi.	Área de calderas (M-11)	Lavandería (M-09)	Gasto por año
Total 2015	15,711	4,885	6,545	3,218	1,011	31,369
Total 2016	14,979	8,937	7,365	2,388	1,403	35,072
Total 2017	16,368	11,576	10,682	2,879	1,576	43,082
Total 2018	16,014	6,587	8,182	3,559	1,226	35,567
Consumo por área	63,071	31,985	32,773	12,044	5,216	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XVII. **Promedio de uso mensual de agua potable por área**

Promedios de uso mensual (m³)					
Año	Usos generales	Producción (M-04)	Producción WFI y agua desmineralizada	Área de calderas (M-11)	Lavandería (M-09)
2018	1 398	659	818	356	123
2017	1 364	965	890	240	131
2016	1 248	745	614	199	117
2015	1 309	407	545	268	84

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La tabla XVII muestra los resultados de los promedios de uso de agua potable por área desde el año 2015. En teoría, si el caudal de los flujos de rechazo

dispuestos al drenaje puede cubrir un área dentro de la planta que no implique daños en algún sistema de servicio, equipo o colaboradores, representa una opción para realizar la oportunidad de mejora.

2.5. Propuesta factible de utilización

A continuación, se describe algunas opciones que pueden realizarse dentro de la planta de Villa Nueva a partir de los análisis realizados anteriormente:

- Agua de rechazo destinada a servicio interno: el servicio interno se refiere a las actividades como mantenimiento del área verde dentro de la planta, así como el servicio sanitario de los edificios. Este es el planteamiento para la utilización del agua, pero se debe indicar que, pese a que es agua utilizada y manipulada por los colaboradores y entra en contacto directo, debe ser agua con calidad y especificaciones mínimas de agua potable. Se debe prever situaciones que pongan en riesgo la salud e integridad del personal que entre en contacto con este tipo de agua si no fuera tratada para conseguir grado de potable.
- Agua de rechazo destinada como agua de alimentación de caldera: el agua es muy necesaria para la operación de la caldera porque genera vapor que se distribuye a toda la planta es uno de los procesos que últimamente ha incrementado su consumo de agua, según el histórico de agua consumida por área. En esta operación, lo más importante que se debe tener en cuenta es que el agua que vaya a ser ingresada al equipo no ocasione incrustaciones dentro de él, estas incrustaciones se deben a la dureza del agua, es por este motivo que antes del ingreso de agua al equipo existe un suavizador que funciona para remover la dureza al agua y así proteger al equipo de daños y complicaciones mecánicas internas.

- Agua de rechazo destinada a la alimentación para lavandería: debería tener ciertas características para que los equipos del área puedan trabajar de forma óptima, ya que la característica de dureza también se ve implicada en la generación de espuma para lavar. Se debe considerar la opción, ya que es posible la utilización para este destino y es un ahorro en el consumo de agua, que representa el 3 % del consumo total de la planta.
- Agua de rechazo destinada a reingresar como agua potable: como se mencionó, el punto mínimo de utilización del agua se refiere a una calidad y condiciones de potable. Independientemente a qué área de la planta se dirija o cuál sea su destino, todo proceso interno tendrá como fluido de alimentación agua potable, si se logra alcanzar este mínimo admisible, el cual no se proyecta lejos porque inicialmente el flujo rechazado tiene buenas características para serlo. Posteriormente se podría realizar el retorno de esta agua rechazada al tanque de agua potable que distribuye agua a todas las áreas y aprovechar el 100 % de esta, siempre que se verifique el análisis microbiológico.

3. ANÁLISIS Y DESARROLLO DE DISEÑO

Existen alternativas de solución con potencial para ser implementadas, en donde se reutilice el agua que el sistema de producción de WFI rechaza. Sin embargo, se debe reconocer las más relevantes con base en las condiciones actuales de la planta y el perfil fisicoquímico del agua que se demostró a través de la metodología analítica realizada.

3.1. Sistema de recuperación de flujo

Este sistema tiene la capacidad de captar agua residual y enviarla hacia algún servicio para su utilización y aprovechamiento. Comprende un diseño técnico que en gran parte es formado por un conjunto de elementos puestos de forma sistemática y especializada que permitirá la captación, conducción, almacenamiento de un fluido a través de líneas que la distribuirán desde un punto de descarga hacia un punto o varios puntos de uso que lo requieran. Este sistema, como otros, tiene la característica de trabajar por medio de una bomba centrífuga que convertirán la energía mecánica de un elemento conocido como impulsor y la convertirá en energía, que el agua rechazada adquirirá en forma de presión para poder mover el fluido de una posición hacia otra.

3.1.1. Características

Un sistema de recuperación se define por una característica especial; se trata de conservar la energía. Durante todo el tratamiento por el que debe pasar el agua cruda se imprime cierta energía para poder de alguna manera purificarla; es decir, que cada pretratamiento anterior conlleva un costo monetario y de

energía. La característica principal de un sistema de recuperación es, en esencia, recuperar esa energía empleada para generar un tipo de agua con cierta pureza por medio del flujo que rechaza el sistema que la produce, y a partir de esta recuperación de flujo aprovechar sus condiciones para ser empleada en un proceso que la requiera.

3.1.2. Utilización

Se entiende que el agua es esencial para la vida y la existencia de la humanidad en un contexto físico en nuestro cuerpo. Sin embargo, esta utilidad se extiende fuera de nosotros debido al estilo de vida desmedido que el ser humano está acostumbrado a llevar; se convierte en un componente vital en la industria para la creación de diferentes productos que son demandados para uso diario; desde la industria textil hasta la industria farmacéutica, cada una de ellas requiere de agua en mayor o menor medida.

3.1.3. Importancia

La primera y la más importante razón por considerar es el tipo de sistema cuyo objetivo es recuperar algo que actualmente es descartable; esto contribuye a la conservación del medio ambiente. Se conoce por estudios que la existencia de agua dulce en el planeta Tierra es limitada y las reservas se están agotando, de tal forma que la única manera de contribuir con la preservación de este recurso es su correcto manejo y control para el sostenimiento de una sociedad consumista que aumenta cada año. Entonces la insuficiencia de este fluido se convertirá en un factor importante por considerar en un futuro cercano, si no se concientiza acerca de su utilización.

Otro punto importante es el ahorro de costos en producción y distribución de agua potable debido a que se utiliza un fluido descartable que ahora se pueda utilizar en otro proceso que lo requiera. Esto representa un ahorro en costos por potabilización de agua cruda y reduce el consumo general de agua en la planta. De esta forma es una industria en pro del ambiente y logra un crecimiento sostenible.

3.1.4. Determinación del tamaño

La medición histórica de las distintas áreas en la planta se lleva a través de registros de consumo de agua que se toman directamente de un contador que mide el flujo de agua servida en cada área; de estos registros se resumió lo que se presenta en la tabla XVII. En relación con las áreas verdes para riego que cuenta actualmente la planta de producción, corresponde a un valor total de 2 267 m². Si por m² de área verde se tiene que regar alrededor de 3 litros por día en un régimen de consumo bajo, entonces el consumo de agua para el mantenimiento de esta área es de 6,8 m³ por día, si se considera únicamente la parte frontal de área verde, que son 5 400 m².

En el área de lavandería se contempla un promedio de 19 lavadas por día. Una lavadora que realiza la operación en un tiempo total de 30 minutos, consume un total de 0,25 m³ de agua, que resulta en un valor total de 4,7 m³ por día. Con respecto al área de calderas, el consumo individual de este equipo es alrededor de 0,7 m³ cada 4 horas y el tanque de alimentación de la caldera se llena de 3 a 4 veces al día, según la producción de la planta en general. En total diario, por lo tanto, asciende a 3 m³.

Los datos de sanitarios ascienden a un valor de 1,5 m³ de consumo diario de agua potable en un área específica dentro de la planta, en donde se considera tanto el área de hombres como de mujeres.

3.2. Área de instalación

La instalación de este sistema conlleva ciertas características; sin embargo, la planta de producción lleva muchos años operando y desde un principio se ha tenido una distribución definida de las estructuras, edificios y equipos. Esto ha cambiado ligeramente durante el tiempo, pero el sistema actual no es la excepción y debe regirse ante tal distribución. Para ello, la línea de distribución, los tanques de almacenamiento, bombas centrífugas, entre otros, dependen de forma tal que su ubicación está basada en este tipo de distribución planteada para ser adecuada y no intervenir en trabajos de adaptación.

3.2.1. Verificación del terreno

El terreno donde se encuentra la planta está inclinado hacia arriba, desde el nivel de la entrada de la planta hasta el último edificio. Este tipo de terreno irregular y con elevación es lo que genera la altura geodésica en el diseño técnico para el transporte del fluido en el sistema de recuperación y distribución. El punto más importante es el uso en la caldera, debido a que representa la mayor cantidad de columna de agua.

3.2.2. Ubicación optimizada

El sistema de agua para inyección se encuentra en un edificio a la mitad del terreno. Desde ese punto se debe enviar el fluido a uno de los puntos más altos de la planta, que es en donde se encuentra la caldera, exactamente a 120 metros

de distancia de ese edificio. Por este motivo se estructura con un tanque pulmón a nivel del sistema y desde un punto ubicado en la terraza del edificio se almacenará en una cisterna (tanque elevado) que captará la mayor cantidad de litros y estará disponible para cada área en la que se distribuirá. La distribución de agua para sanitarios a partir del tanque elevado es únicamente por gravedad y puede ganar presión. Así que el terreno beneficia en un punto de uso, pero compensa su trabajo a otro punto como el área de calderas.

3.3. Diseño técnico

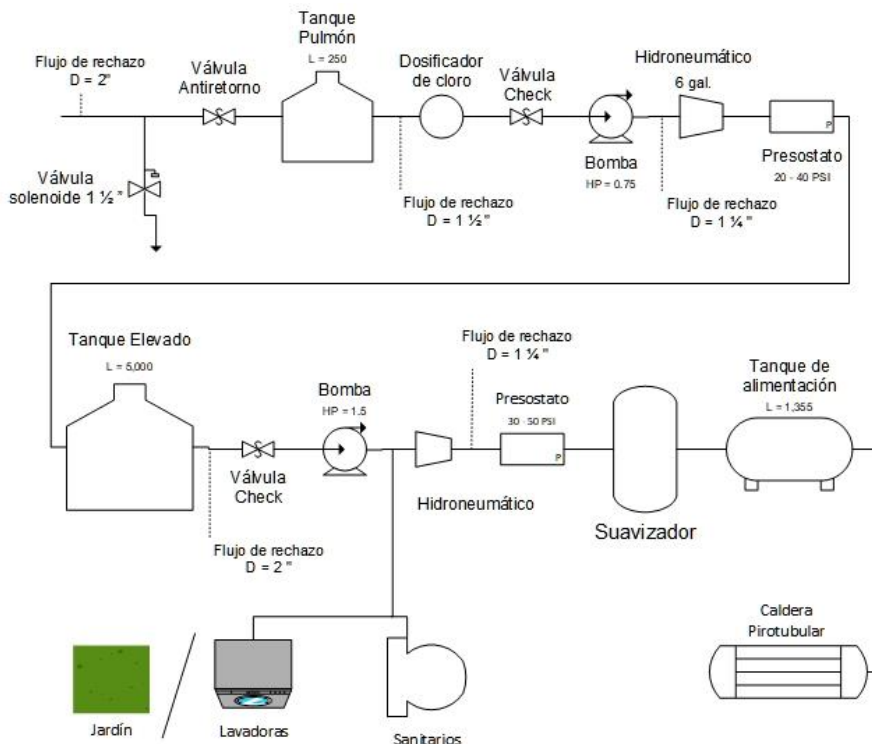
El diseño se basa en la infraestructura actual de la planta para determinar el diseño técnico del sistema, de tal forma que se integre y se logre el objetivo, que es distribuir hacia los distintos puntos el agua rechazada que genera el sistema WFI. Se diseñará un sistema que pueda elevar el fluido y para ello se realizará los cálculos de diseño adecuados, ya que solamente con la presión de salida en la tubería de rechazo no alcanzaría superar la fuerza de gravedad. Por este motivo, para entregar el fluido en un tanque de almacenamiento elevado se necesita de un sistema que requerirá de una serie de equipos e instrumentos con especificaciones mínimas de diseño para un buen funcionamiento.

Es necesario entregar agua con una temperatura promedio de 26 °C con un caudal mínimo de 5 m³/h desde un tanque pulmón a nivel del sistema de producción de agua para inyección, hacia un tanque elevado en la terraza del edificio. Tanto la línea de succión como la línea de descarga serán de plástico, específicamente tubería de CPVC, para la distribución del agua.

3.3.1. Digitalización del sistema

En la figura 31 se ejemplifica el proceso de aprovechamiento de los flujos de agua rechazada, en donde el sistema recupera, almacena y distribuye.

Figura 31. Sistema de recuperación de agua



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Power Point.

3.3.2. Selección de herramienta y equipo

Por ello se presenta la herramienta que se deberá utilizar para instalar el sistema de recuperación. Este comprende bombas centrífugas para el aumento de la presión del agua, tanques de almacenamiento para proveer de agua en los

diferentes puntos de uso y las líneas de tubería por las cuales se distribuirá el fluido. La correcta utilización de la herramienta es importante para llevar a cabo el montaje de este proyecto.

Tabla XVIII. Herramienta para el montaje del sistema

Llave inglesa	Pinzas	Sierra
		
Pegamento para CPVC	Teflón	Cinchos plásticos
		
Cinta de aislar	Cable de uso rudo	Llave Stilson
		

Fuente: Novex. *Nuestros productos*. www.novex.com.gt. Consulta: marzo 2019.

El listado de equipo necesario para el sistema se presenta a continuación.

Tabla XIX. **Equipo necesario para el sistema de recuperación**

Descripción	Equipo	Costo
Bomba de agua con tanque hidroneumático. 0,5 HP y 6 galones. Voltaje: 120V/60 Hz. RPM: 3 450 Caudal máximo: 47 Lpm. T máxima: 50 °C		Q1 551,10
Válvula de fondo (de pie) <ul style="list-style-type: none"> - PVC 1 1/2" - PVC 1 1/4" - PVC 2" 		Q 115,00 Q 84,00 Q 186,00
Cheque horizontal <ul style="list-style-type: none"> PVC 1-1/2" PVC 1" PVC 1-1/4" PVC 2" 		Q 180,00 Q 115,00 Q 155,00 Q 295,00
Tamboplast Capacidad = 250 L. Altura = 0,8 m. Diámetro = 0,7 m.		Q 400,00
Cisterna Capacidad = 5 000 L. Altura = 1,44 m. Diámetro = 2,38 m.		Q 9 635,00
Presostato PSG-1 Accionado por diafragma Presión máxima 40 PSI Tensión 220 V.		Q 200,00

Continuación tabla XIX

Guarda nivel		Q 100,00
Válvula Solenoide		Q 850,00
Tanque hidroneumático vertical Capacidad de 72 L. Vertical		Q 4 650,00
Bomba centrífuga Motor 110 V. Capacidad: 1,5 HP Presión máxima: 60 PSI Caudal: 95 GPM.		Q 3 200,00

Fuente: Rotoplast S.A. *Catálogo de bombas*. www.rotoplascentroamerica.com.

Consultado: marzo 2019.

3.3.3. Selección de material conforme categoría

El material indicado para la conducción del agua rechazada es el policloruro de vínico clorado (CPVC). Es la mejor elección para preservar las condiciones del agua y su rango de trabajo en relación con temperatura y presión acorde a lo que queremos en la tubería de distribución. Sin embargo, también se puede trabajar con policloruro de vinilo (PVC), aunque no se recomendaría por cuestión de seguridad y rendimiento del equipo. Este tipo de material puede ser utilizado según su ficha técnica general en sistemas de agua caliente, fría y helada, al

igual que el CPVC. La diferencia de este último radica en su resistencia y ampliación de parámetros técnicos, como temperatura y presión, lo que lo hace más resistente.



Figura 32. **Propiedades físicas y químicas de CPVC**

Propiedad	Descripción.	
Presión Hidrostática	28 Kgf/cm ² (400 psi) @ 23 °C, 8,8 kgf/cm ² (125 psi) @ 82°C	
Impacto	A 60.69 cm. con bala de 5.44 Kg., en tubo de ¾" de diámetro. Alta resistencia sin deformación, ni grietas o fisuras.	
Corrosión	Resistencia alta a la oxidación (Interna, externa y galvanica).	
Temperatura operación	De -20 °C a 82 °C, en condiciones normales de operación domestica.	
Flamabilidad	Es autoextinguible y no propaga flama	
Temp. de ablandamiento (viat)	110 °C	
Eléctrica	Por ser un material plástico no conduce la electricidad, es dieléctrico.	
Propiedad	Valores	ASTM
Gravedad Especifica	1.55	D792
Modulo de elasticidad @ 23°C, psi	4.23 x 10 e5	D256A
Conductividad Térmica BTU/hr./ft.2°F/in.	0.95	C177
Índice de Límite Oxígeno	60%	D2863
Conductividad Eléctrica	No conductor	-
Explosividad	Nula	-
Resonancia de sonido	Factor 4	-
Temperatura de fusión	480 °C	-
NFPA Flamabilidad	Clase A Extinguible c/agua	

Fuente: Durman. *Catálogo de tubería CPVC*. www.durman.com. Consulta: febrero 2019.

Este tipo de tubería se puede encontrar comercialmente en presentación de 6 y 3 metros; ahora bien, es necesario conocer el costo de estos y para ello se tiene un aproximado de este tipo de tubería en la siguiente tabla.

Tabla XX. **Tubería CPVC para distribución de agua**

	Tubo CPVC de ½" Longitud = 6 m. Resistencia de presión = 100 PSI	Q 62,00
	Tubo CPVC DE ¾" Longitud = 6 m. Resistencia de presión = 100 PSI	Q 96,00

Fuente: Novex. *Catálogo de tubería*. www.novex.com.gt. Consulta: marzo 2019.

3.3.4. Dimensionamiento de diámetro de descarga (elevación)

Tomando en cuenta que la velocidad de descarga será igual a 2,5 m/s o 9 000 m/h, la cual corresponde a una velocidad recomendada por algunos apuntes realizados en la práctica. Se realiza de esta manera con el afán de que el tanque pulmón no sea tan grande y que se vacíe de forma rápida y constante. Procediendo con el cálculo para el diseño de este sistema, es necesario considerar las siguientes ecuaciones.

$$\text{Caudal} = Q = v * A \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Área de un círculo} = A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad \text{Ecuación 2}$$

Reemplazando el área de un círculo en la ecuación de caudal

$$Q = v * \frac{\pi * D^2}{4} \quad \text{Ecuación 3}$$

Despejando para diámetro

$$D = \left(\frac{4Q}{v * \pi} \right)^{0,5} \quad \text{Ecuación 4}$$

Se resuelve la ecuación 4 para determinar el diámetro de descarga en la tubería:

$$D = \left(\frac{4 (5 \text{ m}^3/\text{h})}{(9000 \text{ m/h}) * \pi} \right)^{0,5} = 0,0266 \text{ m.} = 26,6 \text{ mm.}$$

Lo que se aproxima comercialmente a un diámetro interno de una tubería de 1 pulgada para un tubo tipo CPVC. Notar que la velocidad corregida para este tipo de diámetro es de 2,57 m/s, o bien 9 252 m/h.

3.3.5. Dimensionamiento de diámetro de succión (elevación)

Se utiliza la ecuación 4 para determinar el diámetro de succión, conociendo que la velocidad del flujo es de 1,5 m/s o bien 5 400 m/h.

$$D = \left(\frac{4 (5 \text{ m}^3/\text{h})}{(5\,400 \text{ m/h}) * \pi} \right)^{0,5} = 0,0343 \text{ m.} = 34,3 \text{ mm.}$$

Este valor se traduce en un diámetro comercial de 1¼ pulgada de tubería CPVC. La velocidad corregida para el mismo diámetro utilizando la ecuación 3, da como resultado 5 328 m/h; es decir 1,48 m/s de velocidad del flujo en la tubería de descarga.

3.3.6. Altura dinámica total de bombeo

Al utilizar la ecuación para fluidos incompresibles de Bernoulli se concluye que:

$$\Delta H = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2*g} + Z_2 - \frac{P_1}{\rho} - \frac{v_1^2}{2*g} - Z_1 + \text{Pérdidas} \quad \text{Ecuación 5}$$

De esto concluimos que las presiones y velocidades en los puntos A y B son iguales, por lo que se hacen cero algunos elementos en la ecuación. Como resultado tenemos la altura dinámica, es la suma de las pérdidas en tubería y la altura geodésica, como se muestra a continuación:

$$\Delta H = Z_2 - Z_1 + \text{Perdidas} = H \text{ Geodésica} + H \text{ Pérdida en tubería} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$H \text{ pérdida} = H \text{ primarias} + H \text{ secundarias} \quad \text{Ecuación 7}$$

Las pérdidas primarias se calculan con la ecuación de Darcy para determinar la altura por medio de las pérdidas generadas en la tubería. Este valor se consigue a través de la siguiente ecuación.

$$H_f = \frac{f L V^2}{2 g D} \quad \text{Ecuación 8}$$

El factor de fricción (f), necesario para dar solución a la ecuación anterior y conocer un valor de pérdidas por la tubería, se puede conocer mediante el valor del número de Reynolds. Para ello es necesario realizar los siguientes cálculos.

$$NRe = \frac{V * D_s}{\nu} \quad \text{Ecuación 9}$$

V = velocidad del fluido = 1,48 m/s

ν = viscosidad cinemática = $8 * 10^{-7}$ m²/s

D_s = diámetro de tubería interna succión = 0,0346 m.

Se reemplaza valores para determinar el número de Reynolds, tomando en consideración que un Re mayor a 10 000 se considera un flujo turbulento.

$$NRe = \frac{(1,48) * (0,0346)}{(8 * 10^{-7})} = 64\ 010$$

Para utilizar el diagrama de Moody y determinar el valor de fricción, es necesario también conocer el valor que resulta de la relación de la rugosidad del material con el diámetro de la tubería, para ello tenemos el siguiente análisis.

$$\frac{D}{\varepsilon} = \frac{0,0346}{3 * 10^{-7}} = 115\ 333 \quad \text{Ecuación 10}$$

D = diámetro de tubería interna succión = 0,0346 m.

ϵ = coeficiente de rugosidad para plásticos = $3 \cdot 10^{-7}$ m.

Con estos valores preliminares se puede proceder a utilizar la gráfica de Moody y conocer un valor aproximado de factor de fricción. O bien la manera de que utilizaremos es a través de la ecuación 11 (factor de fricción para flujo turbulento, Mecánica de Fluidos, Robert Mott 7a. Edición).

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7(D/\epsilon)} + \frac{5,74}{N_R^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Ecuación 11

El resultado obtenido de la ecuación 11, por medio de la sustitución de los componentes es de $f = 0,0197$. Resolviendo la ecuación 7 para conocer la altura otorgada por las pérdidas primarias en la tubería.

$$H_f = \frac{f L V^2}{2 g D} = \frac{(0,0197) (25) (1,48)^2}{2 (9,81) (0,0346)} = 1,59 \text{ m.}$$

L = longitud total = 25 m.

g = gravedad = 9,81 m/s²

V = velocidad = 1,48 m/s

D = diámetro interno de succión = 0,0346 m.

Continuamos con las pérdidas secundarias, las cuales comprende pérdidas por accesorios que forman parte de la tubería y son necesarias para su óptima utilización.

$$hf = \Sigma k \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

Ecuación 12

Haciendo uso de la tabla de coeficiente de pérdidas para la sumatoria de las mismas.

$$1 \text{ válvula de seguridad} = 1 * 2,5 = 2,5$$

$$1 \text{ válvula de pie} = 1 * 0,8 = 0,8$$

$$\Sigma k = 2,5 + 0,8 = 3,3$$

Tabla XXI. **Coeficiente de pérdidas K por accesorio**

Accesorios	K
Válvula esférica (totalmente abierta)	10
Válvula en ángulo recto (totalmente abierta)	5
Válvula de seguridad (totalmente abierta)	2.5
Válvula de retención (totalmente abierta)	2
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	0.2
Válvula de compuerta (abierta $\frac{3}{4}$)	1.15
Válvula de compuerta (abierta $\frac{1}{2}$)	5.6
Válvula de compuerta (abierta $\frac{1}{4}$)	24.0
Válvula de mariposa (totalmente abierta)	-
"T" por la salida lateral	1.80
Codo a 90° de radio corto (con bridas)	0.90
Codo a 90° de radio normal (con bridas)	0.75
Codo a 90° de radio grande (con bridas)	0.60
Codo a 45° de radio corto (con bridas)	0.45
Codo a 45° de radio normal (con bridas)	0.40
Codo a 45° de radio grande (con bridas)	0.35

Fuente: Mott Robert. *Mecánica de Fluidos*, p 200.

$$hf = (3,3) \left(\frac{(1,48)^2}{2(9,81)} \right) = 0,368 \text{ m.}$$

Para determinar el total de pérdidas producidas en la tubería de succión se reemplaza valores en la ecuación 6 y de esta manera ese valor será para el área de succión, pero de igual forma se realiza para el lado de la descarga. De este modo se puede determinar lo siguiente

H pérdida en tubería succión = $1,59 \text{ m} + 0,368 \text{ m} = 1,96 \text{ m}$.

H pérdida en tubería succión = $7,62 \text{ m}$.

3.3.7. Potencia de la bomba centrífuga

Con el uso de la ecuación 13 se puede determinar la potencia de la bomba que se utilizará en el proceso de bombeo para elevar el agua hacia un tanque elevado.

$$P_b = \frac{H \text{ total} * \rho * g * Q}{\eta} \quad \text{Ecuación 13}$$

η = eficiencia = 70 %

$H \text{ total} = 4 \text{ m. de altura} + 9,58 \text{ m. de perdidas} = 13,58 \text{ m}$.

$Q = 5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,001388 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = \text{caudal}$

$\rho = 995,71 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \text{densidad del agua}$

Se resuelve la ecuación y se reemplaza datos en la ecuación 10:

$$P_b = \frac{(13,58) * (995,71) * (9,81) * (0,001388)}{0,70} = 263 \text{ W} * \frac{1 \text{ HP}}{746 \text{ W}} = 0,35 \text{ HP}$$

Adicionalmente, en este apartado se puede conocer la potencia del motor eléctrico estándar cuyo valor se calcula con la ecuación 14. Se realiza el análisis a partir de la potencia de la bomba.

$$P_m = \frac{P_b}{0,9} = \frac{(0,263)}{0,9} = 0,29 \text{ kW} \quad \text{Ecuación 14}$$

3.3.8. Evaluación de NPSH

$$P_{atm} = 100 \text{ kPa}$$

$$h_{sp} = (100,5 * 10^3 \text{ N/m}^2) / (9,8 * 10^3 \text{ N/m}^3) = 10,26 \text{ m.}$$

$$h_s = 2,5 \text{ m.}$$

$$h_f = 2 \text{ m.}$$

$$h_{vp} = 0,435 \text{ m. (30 °C)}$$

$$NPSH = h_{sp} + h_s - h_f - h_{vp} = 10,26 + 2,5 - 2 - 0,435 = 10,33 \text{ m.}$$

El resultado que viene del análisis anterior da como resultado una carga de succión neta positiva (NPSH) disponible igual a 10,33 m. Sin embargo, es necesario conocer el NPSH requerido para la bomba.

$$NPSH_r = \frac{10,33}{1,10} = 9,4$$

Tabla XXII. Cuadro de resultados para diseño del sistema de bombeo

Diseño para elevación	Prealmacenaje		Almacenamiento	
	Valor	Unidad	Valor	Unidad
Caudal	5,00	m ³ /h	4,00	m ³ /h
Elevación	5,00	m.	20,00	m.
Diámetro de descarga	1,25	Pulg.	1,25	Pulg.
Velocidad de descarga	1,48	m/s	1,18	m/s
Diámetro de succión	1,50	Pulg.	2,00	Pulg.
Velocidad de succión	1,08	m/s	0,60	m/s
Longitud total	29,00	Metros	135,00	Metros
Número de Reynolds	5,47*10 ⁴	--	3,64*10 ⁴	--
D/ε	134 667,00	--	162 000,00	--
Factor de fricción	0,0204	--	0,0224	--
Altura dinámica total de bombeo	8,40	Metros	25,40	Metros
Potencia de la bomba teórico	0,22	HP	0,52	HP
Potencia de la bomba fabricante (Pedrollo – trifásica CP610)	0,85	HP	1,50	HP
Potencia del motor eléctrico	0,16	kW	0,40	kW
NPSH	9,40	--	10,11	--
Capacidad del tanque	250,00	Litros	5 000,00	Litros
Capacidad de hidroneumático	6,00	Gal.		Gal.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.3.9. Tanque de almacenamiento

Existe una medida de seguridad para el diseño del tanque pulmón que se encuentra a nivel de tierra, paralelo al sistema que genera los flujos de rechazo. Debido al espacio reducido en el área donde se encuentra tal sistema, se debe realizar el diseño de este tanque un poco más reducido para que no existe

interferencia que pueda afectar con el sistema principal de producción de agua para inyección. Se logrará este objetivo debido a que el sistema diseñado contará con la capacidad de vaciar constantemente su tanque pulmón para enviarla hacia un tanque elevado del cual se distribuirá para el área de calderas.

$$\frac{dv1}{dt} = Q = 1,365 \frac{m^3}{h} = \text{Caudal de ingreso al tanque}$$

Debido a este dato de caudal de ingreso que corresponde a la derivada del volumen en relación al tiempo, es decir una razón de llenado del tanque ya que se puede determinar cómo cambia la altura conforme el tiempo para el llenado del tanque. Se conoce que comercialmente un tinaco mide 0,7 metros de diámetro.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\left(\frac{dv}{dt}\right)}{\pi * r^2} = \frac{1,365}{\pi \left(\frac{0,7}{2}\right)^2} = 3,55 \text{ m/h}$$

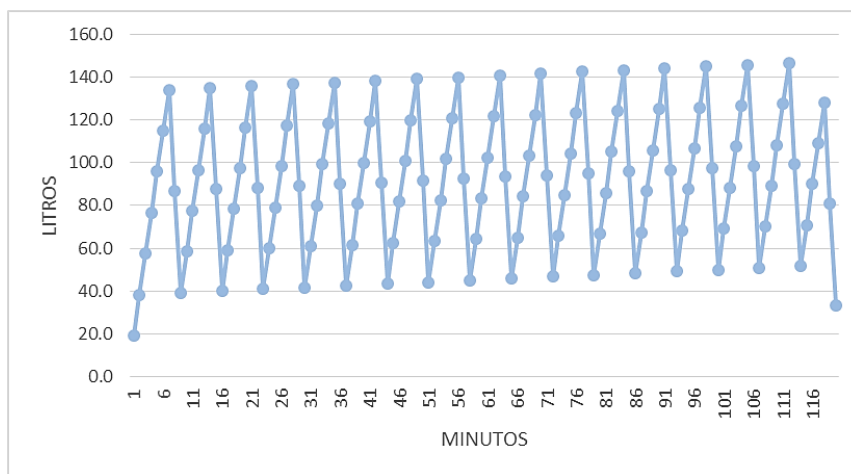
Esta es la razón de cambio de la altura cuando el tanque se está llenando, para poder vaciar el tanque pulmón se debe tener un caudal mayor, siendo este aproximado al valor que se muestra a continuación:

$$\frac{dv2}{dt} = Q = 4 \frac{m^3}{h} = \text{Caudal de salida del tanque}$$

De tal forma se puede realizar un análisis gráfico de lo que anteriormente se ha comentado, ya que la variación del volumen en el tanque se mantiene hasta cierto punto dependiendo de las veces que se active la bomba para realizar el vaciado del tanque pulmón. Sin embargo, la ficha técnica de una bomba centrífuga de 0,5 HP dice que el máximo de puestas en marcha para una bomba

de este tipo es de 40 por hora, observando el diagrama se puede notar que durante dos horas, con un caudal de 5 m³/h, el tanque muy bien podría ser de un volumen de 250 litros considerando un factor de seguridad y las medidas comerciales actuales para tanques.

Figura 33. **Variación del tanque pulmón versus tiempo**

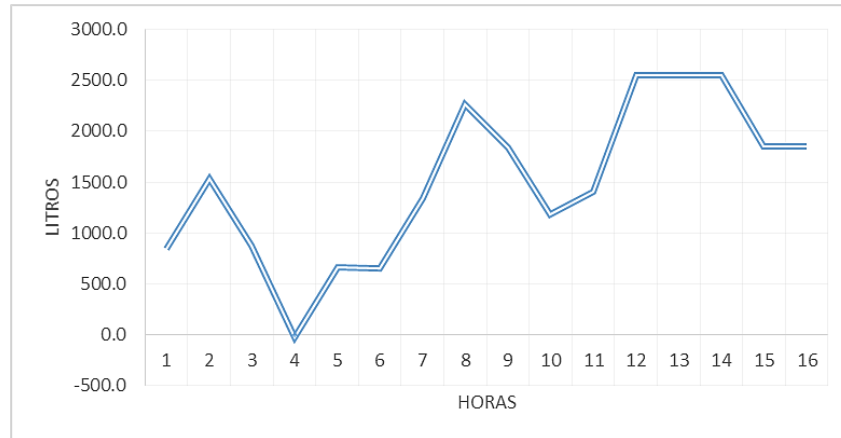


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Caso contrario con el tanque de almacenamiento elevado, se tiene un consumo de diferentes puntos. Se debe hacer la salvedad que el flujo rechazado por el sistema de WFI solo provee en promedio un volumen de 13 800 litros al día de agua rechazada.

Debido al uso del flujo de condensado en la caldera, el de agua potable se reduce a llenar el tanque para el consumo de la misma 4 veces al día, a intervalo de aproximadamente 5 horas entre cada llenado, de las cuales dan en total los 3 m³ antes mencionados. Por este motivo se conoce la siguiente información.

Figura 34. **Variación del tanque elevado versus tiempo**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.4. Instrumentación mecánica

La instrumentación en un sistema es fundamental para el control del funcionamiento, rendimiento, capacidad y mantenimiento del mismo. De esta forma se da conocer que cada instrumento instalado ayuda a mantener los parámetros deseados y evitar potenciales daños.

3.4.1. Criterios de medición

En este sistema se tendrá contemplado variables importantes como el caudal recuperado, la presión de trabajo y la presencia de impurezas en el fluido. Por ello es imprescindible implementar dentro del sistema una serie de instrumentos de medición como flujómetros y medidores de presión. Tomando en cuenta la seguridad del sistema de bombeo se debe instalar electroniveles; estos ayudarán a proteger las bombas de trabajar en los momentos donde no se necesita o que sobretrabajen los equipos. Este tipo de protecciones que

mantienen segura la bomba de sobrecarga de trabajo también deben estar controlados y gobernados por el funcionamiento básico del sistema que es servir agua hacia un destino en concreto.

Ahora bien, los criterios de medición son imprescindibles para controlar los parámetros del sistema y obviamente administrar este sistema; por lo tanto, se deberá calibrar los equipos a cierta presión y caudal para que el sistema se mantenga en buenas condiciones de trabajo, no subdimensionado ni sobredimensionado.

3.4.2. Selección de equipo

La instrumentación mecánica del sistema es crucial para poder recuperar, controlar y distribuir el agua rechazada que producirá el sistema, se contempla adquirir equipo necesario con un funcionamiento específico que trabajará de forma integral para alcanzar el propósito del sistema, el equipo se menciona en la tabla XIX.

3.5. Equipo seleccionado

En la selección del equipo prevalece la esencia del diseño técnico y la disponibilidad comercial, existirá variabilidad dependiendo de marcas y el proveedor; a pesar de esto se debe mantener y cumplir para que el sistema no sufra de deficiencias en el sistema e igualmente se desaproveche el flujo de rechazo generado por el sistema WFI y el proceso general no cumpla su propósito.

3.5.1. Propuesta viable

La propuesta viable es el resultado de la búsqueda de servicios internos que requieren agua, la cual se suministra a través del tanque principal de almacenamiento dentro de la planta. Para ello se incurre en gastos de producción debido a que estos servicios realizan un tratamiento previo a su alimentación. La propuesta viable se enfoca en hacer uso de agua rechazada que puede llegar a cumplir los requerimientos de un servicio dentro de la planta sin realizar tratamientos previos, ya que este tipo de flujo cuenta con un perfil definido y el mismo no debería afectar el equipo, entorno o alterar las condiciones del área en donde sea utilizada.

Inicialmente se contempló la idea de realizar un retorno de todo el flujo rechazado hacia el tanque de agua potable que se encuentra en la planta para aprovecharla completamente, independiente al uso que se le fuera a dar. Teóricamente, este tipo de agua procesada industrialmente cumple con las características fisicoquímicas que requiere este tanque de almacenamiento. Sin embargo, debido a que cuenta con valores de conductividad muy altos, la combinación de ambos fluidos aumentaría de forma gradual la conductividad dentro del tanque de almacenamiento. Esto se traduce en que la concentración de iones del cual se obtiene el resultado de conductividad aumentaría en el tanque de agua potable; mientras más conductividad tenga el agua de ingreso al sistema WFI entonces el sistema deberá realizar un mayor trabajo para remover tales contaminantes. Este tipo de agua es clasificada como aguas industriales residuales, por lo cual la gestión sanitaria de la misma debe contemplarse. Por último, debido a que esta agua tiene menos cloro, la concentración de cloro en el tanque disminuiría y tendría que dosificarse una mayor cantidad de hipoclorito de sodio para controlar el crecimiento de microorganismos dentro del tanque de almacenamiento principal.

Como requisito mínimo para reutilizar el flujo de rechazo, debe convertirse en agua potable nuevamente al dosificarle cloro, para cuidar la integridad de cada colaborador que por algún motivo entre en contacto con este tipo de agua. En esta etapa se desarrollará y analizará tres escenarios importantes que se han tomado con base en las características del flujo de rechazo. Este tipo de escenarios tiene que ver con direccionar el proyecto hacia una solución accesible y factible para la planta.

3.5.2. Flujo servido

Durante los meses de enero a octubre en 2018, el total de agua rechazada en el área de tratamiento de aguas fue aproximadamente de 4 887,6 m³. Este rechazo contempla dos tipos de agua: uno de ellos es el generado por el sistema de producción de agua para inyección y el otro se trata del sistema de agua desmineralizada; esto se debe a que existe solamente un instrumento de medición que contabiliza el flujo servido para ambos sistemas. Por este motivo se debe determinar la cantidad de litros de agua rechazada para cada sistema, este valor resulta de la relación de regeneraciones y puesta en marcha que se le realiza mensualmente al sistema de producción de agua desmineralizada, con respecto al total de agua rechazada, como se detalla en la tabla XXIII.

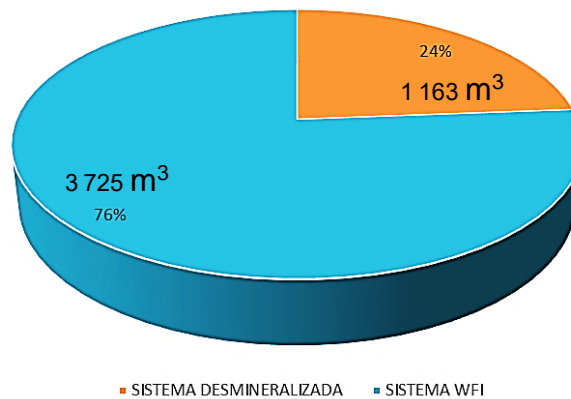
Según los datos históricos promedio de regeneraciones del sistema, por cada regeneración que sufre el sistema se debe utilizar 14,2 m³ de agua potable. Para poner en marcha el sistema se debe realizar un procedimiento preproducción en el que se utiliza en promedio, 0,3 m³. De esta manera se sabe que el sistema de agua desmineralizada rechaza un total aproximado de 1 163 m³ de agua parcial del año 2018. Con la relación de porcentaje con el total de agua rechazada durante el año, se obtiene los siguientes resultados.

Tabla XXIII. **Flujo rechazado en el sistema de agua desmineralizada**

Mes	Renovaciones al mes	Rechazo por regeneración (m ³)	Producción al mes	Rechazo por producción (m ³)	Flujo total de rechazo (m ³)
Enero	7	99,36	9	3,07	102,42
Febrero	3	42,58	10	3,41	45,99
Marzo	6	85,16	11	3,75	88,91
Abril	7	99,36	12	4,09	103,44
Mayo	9	127,74	20	6,81	134,56
Junio	10	141,94	18	6,13	148,07
Julio	10	141,94	23	7,83	149,77
Agosto	8	113,55	19	6,47	120,02
Septiembre	10	141,94	20	6,81	148,75
Octubre	8	113,55	21	7,15	120,70
Total	78	1 107,11	163	55,53	1 162,64

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 35. **Porcentaje de agua rechazada en tratamiento de aguas**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Un 24 % del total de agua rechazada la produce el sistema de agua desmineralizada y el 76 % restante corresponde al sistema de producción de WFI, que corresponde a 3 725 m³ de agua rechazada que genera el sistema de producción de agua para inyección. A partir de este valor se puede conocer un promedio diario de los litros por hora rechazados por el sistema de agua. Con base en la siguiente conversión y tomando ciertas consideraciones técnicas de tiempos de trabajo se puede concluir el siguiente resultado.

$$\text{Rechazo} \left(\frac{L}{h} \right) = \frac{3\,724\,994 \frac{L}{\text{año}}}{10 \text{ meses} * 27 \text{ días} * 12 \text{ horas}} = 1\,150 \frac{L}{h} = 1,15 \frac{m^3}{h}$$

En resumen, durante los meses de enero a octubre del año 2018 se rechazaron en promedio, por hora, 1,15 m³ de agua, lo que se traduce en un rechazo diario de 13 800 litros de agua con una temperatura promedio de 26 °C.

3.5.3. Razón y consecuencia

Independiente del servicio a donde se vaya a enviar este tipo de agua rechazada para su aprovechamiento, se debe tener en claro que la razón principal de hacerlo es disminuir el consumo de agua cruda para ahorrar unos cuantos miles de quetzales mensuales. Si se considera el hecho de dejar de producir agua potable; esto significa un crecimiento sostenible de la planta en el tiempo. La reutilización de agua residual genera un impacto diferente en cada área o bien la posible mejora que puede resultar respecto al cambio de alimentación en los servicios. Debido a este nuevo panorama, se generó un registro analítico de las características del agua potable que se distribuye a cada uno de los servicios dentro de la planta y también los valores de agua rechazada del sistema de producción de agua para inyección. Se realizó una comparación

de registros para determinar el perfil servido de agua residual a cada área contra el perfil de agua potable producida. Los resultados se muestran en la figura 36.

Figura 36. **Registro analítico de agua potable contra agua rechazada**

Descripción	Tanque de agua potable		Recolector de agua rechazada	
	Valor	Unidad	Valor	Unidad
Cloruro (< 250 ppm)	5,90	(mg/L)	13,10	(mg/L)
Dureza total (< 250 ppm)	45,00	(mg/L)	< 5,00	(mg/L)
Calcio (< 250 ppm)	29,00	(mg/L)	< 10,00	(mg/L)
Magnesio (< 250 ppm)	8,90	(mg/L)	< 5,00	(mg/L)
Sulfato (< 250 ppm)	< 5,00	(mg/L)	< 5,00	(mg/L)
Nitrato (< 250 ppm)	2,80	(mg/L)	2,40	(mg/L)
Nitrito (< 250 ppm)	< 0,010	(mg/L)	< 0,01	(mg/L)
Manganeso total (< 250 ppm)	< 0,10	(mg/L)	< 0,10	(mg/L)
Hierro total (< 250 ppm)	< 1,00	(mg/L)	< 1,00	(mg/L)
Conductividad (100 - 750 μ S/cm)	204,00	μ S/Cm	374,00	μ S/Cm
Sólidos totales disueltos (< 250 ppm)	122,00	(mg/L)	224,00	(mg/L)
Potencial de hidrógeno (6,5 – 8,5)	7,69	--	7,79	--
Apariencia (fluido incoloro, inodoro y transparente)	CUMPLE	--	CUMPLE	--
Cloro libre residual (0,5 - 2 mg/L)	0,92	(mg/L)	< 0,05	(mg/L)

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En resumen, el agua rechazada tiene más conductividad respecto al agua potable de ingreso. Esto se debe a que dentro del proceso de ósmosis se genera una concentración de iones en la superficie de la membrana que son arrastradas por la misma corriente rechazada, esto se traduce en una conductividad mayor. Un valor que es directamente proporcional al resultado de conductividad se trata de los sólidos totales disueltos que se halla en el agua analizada.

3.5.3.1. Agua de rechazo para riego

La razón principal para reutilizar este tipo de agua en riego de áreas verdes es que por razones sanitarias no entra en contacto humano; esto representa un riesgo que antes se exponía. Se ha verificado a través del estudio fisicoquímico que este tipo de agua efectivamente es adecuada para este tipo de área. Sin embargo, la consideración principal de esta alternativa en específico es la temperatura, debido a que puede dañar el área verde si se encuentra caliente. En este caso, se ha verificado que el agua de rechazo es expulsada a una temperatura promedio de 26 °C, con excepción de cuando se realiza el proceso de sanitización del equipo.

3.5.3.2. Agua de rechazo para caldera

Esta área es recomendada para enviar el agua rechazada. Valores mínimos de dureza presentes en el agua ayudan a mejorar el rendimiento del suavizador que trabaja para producir agua de alimentación de caldera. El resultado es prolongar la vida útil del equipo en general y de la resina utilizada en el suavizador; a su vez, se traduce en ahorro en costo de materiales para el mantenimiento del suavizador.

3.5.3.3. Agua de rechazo para sanitarios

Se considera una buena alternativa para utilizar el agua rechazada del sistema WFI. No es necesario realizar algún tratamiento previo; solamente se requiere la instalación de una nueva línea que suministre este tipo de agua a los diferentes puntos en los baños. Es necesario considerar este tipo de agua única y exclusivamente para sanitarios y mingitorios.

3.5.3.4. Agua de rechazo para lavandería

En esta área se trabaja con productos que se agregan como aditivos al agua para poder enjuagar la ropa y limpiarla adecuadamente. El reto en esta área era que el tipo de perfil de agua rechazada pudiera competir con estos productos y como resultado tener complicaciones en los equipos y desgaste en la ropa. Sin embargo, esto no es así. Al contactar con el fabricante y proveedor de estos productos se confirmó que el agua sin dureza ayuda a mejorar los ciclos de lavado y que de ninguna manera representa un daño en el área.

3.6. Montaje de equipo

El proceso de montaje debe asegurar dos principales factores. Uno de ellos es el funcionamiento del sistema. Durante la instalación pueden surgir imprevistos, pero estos no deben determinar el correcto funcionamiento del mismo. Por este motivo, es importante que los instaladores tengan las competencias necesarias para hacerlo.

Segundo, cumplir con el caudal necesario en los diferentes puntos donde se va a utilizar el fluido. El equipo puede funcionar pero si no cumple el caudal necesario en las áreas de destino no comprenderá una oportunidad de mejora.

3.7. Verificación del funcionamiento

Se debe realizar una verificación de los planos del sistema, el diseño técnico de los equipos y los accesorios previstos anteriormente para la puesta en marcha del sistema. Para ello se debe realizar una evaluación y verificación de las unidades que el proveedor entrega, con base en los siguientes puntos.

- Sacar el producto del embalaje
- Revisar que no hagan falta piezas de las estipuladas
- Revisar la integridad de las piezas para que ninguna esté dañada
- Verificar que el producto y modelo sea correspondiente al deseado
- Realizar las reclamaciones al proveedor de caso contrario

3.7.1. Calidad en la operación

En el comienzo se destacó algo importante en relación con las certificaciones que se manejan en esta empresa. Es importante aplicar en todo momento una buena gestión de la calidad y desarrollar el sistema de recuperación de agua y mantenerlo en contexto con las buenas prácticas de manufactura que maneja la empresa, incluyendo la operación de montaje. Así que la calidad en la operación tiene que ver con los siguientes puntos por considerar para poner en práctica este apartado.

- Seguridad y limpieza en el montaje
- Utilización de herramienta adecuada
- Cimientos en la colocación del equipo
- Ubicación del sistema
- Correcta fijación de la línea de distribución
- Verificación del correcto funcionamiento

3.7.2. Operación y mantenimiento

El sistema se opera a través de una serie de llaves que son parte de un sistema de control manual que está disponible para ser activado o no, según el criterio del técnico supervisor. Estos serán dispuestos para manejar el sistema y las diferentes válvulas que lo conforman.

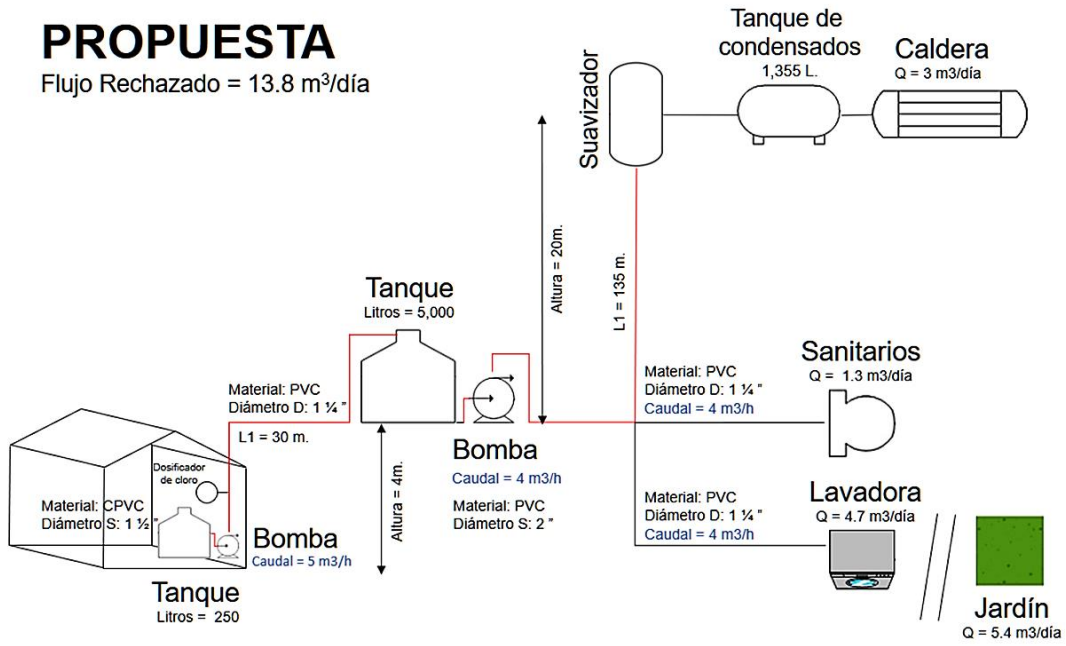
A partir de su montaje se debe realizar un correcto mantenimiento del sistema y hacer de esta una rutina de control e inspección. Algunas de las tareas más importantes en el mantenimiento de este sistema son las que asegurarán el correcto funcionamiento a largo plazo, con el propósito de prolongar la vida útil de los equipos y asegurar el buen manejo del agua rechazada a partir del punto de salida del sistema de producción WFI, estas se enlistan a continuación:

- Riesgo de daños por operación en seco
- Controlar el nivel de vibración
- Correcto nivel de aceite
- Realizar la sanitización de las líneas
- Estado de piezas expuestas a desgaste
- Control del crecimiento de bacterias y dureza
- Control de los instrumentos mecánicos
- Inspección de la presión de funcionamiento
- Controlar el caudal en los puntos de uso
- Especificar el flujo distribuido hacia los demás colaboradores
- Controlar si existe fugas en el sistema
- Ajuste y fijación de elementos en los equipos
- Verificar la integridad de los sellos mecánicos, cojinetes e impulsores
- Verificar la potencia de la bomba

3.8. Propuesta viable

Con respecto a mediciones reales del lugar y cálculos realizados en la sección 3.3, se da a conocer la propuesta final presentada, una representación acertada y concreta del proyecto de recuperación de flujos de rechazo se puede encontrar en la figura 37.

Figura 37. Plano general del sistema de recuperación de agua



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Power Point.

4. ESTUDIO FINANCIERO

4.1. Costo del proyecto

El costo del proyecto de recuperación de agua rechazada considera ciertos recursos y actividades necesarias que se deben llevar a cabo en cuanto a diseño, operación y mantenimiento. Esto se resume en un aumento en los gastos o más bien una inversión que se podrá amortizar luego en el tiempo. El objetivo de este apartado es conocer de forma objetiva los gastos en los que se incurre para llevar a cabo el proyecto, desde diseño hasta la operatividad del mismo, de esta manera ver el escenario completo aplicable al proyecto con un presupuesto determinado.

4.1.1. Planificación de costos

La planificación de los costos se realizará por medio de etapas para llevar un orden en los entregables que se desean del proyecto. Para esto se considera 3 fases que son:

- Fase de ingeniería: se refiere a la ingeniería de detalle, recopilación de datos iniciales, cálculo del equipo y demás información necesaria para la resolución y puesta en marcha del proyecto. Esta fase es la que se desarrolló en los capítulos anteriores con el fin de plantear el proyecto como una propuesta factible para su realización.
- Fase de ejecución: en esta fase se debe detallar los entregables físicos que la persona responsable de la instalación debe presentar; por ejemplo, la instalación de las líneas de distribución, de las bombas centrifugas, de

los tanques de almacenamiento, de la instrumentación para control y equipo auxiliar.

- Fase de cierre: en esta fase se debe realizar la demostración del funcionamiento óptimo del sistema instalado, con pruebas para verificar el mismo. Posteriormente, el encargado de la instalación del proyecto debe entregar los planos de instalación mecánica y eléctrica, manuales del equipo y la garantía del trabajo realizado.

Además, se debe considerar aquellos factores de operatividad necesarios para que el sistema funcione, como el consumo de energía eléctrica y el control del sistema por personal del departamento. De cada una se derivan gastos adicionales, los cuales generan como consecuencia un costo total de proyecto.

4.1.1.1. Costo de operación

El costo de operación es el resultado de aquellos costos necesarios para mantener el sistema de bombeo de agua de recuperación funcionando cada día para distribuir el fluido hacia los puntos de uso.

Tabla XXIV. Costo de operación del sistema de recuperación

Costo de operación					
Descripción	Unidad	Costo unitario	Cantidad	Costo total	
				Mes	Año
Operación					
Técnico supervisor (mensual)	Unidad	Q 250,00	12	Q 250,00	Q 3 000,00
Trabajador (mensual)	Unidad	Q 160,00	12	Q 160,00	Q 1 920,00
Materiales e insumos					
Herramienta (anual)	Global	Q 400,00	1	Q 33,33	Q 400,00
Identificación de flujo (anual)	Global	Q 125,00	1	Q 10,42	Q 125,00
Gasto por servicio					
Energía eléctrica (mensual)	Global	Q 870,00	12	Q 870,00	Q 10 440,00
Total costo operación				Q 1 323,75	Q 15 885,00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.1.1.2. Costo de mantenimiento

El costo de mantenimiento está dado por los costos involucrados en las actividades relacionadas con mantenimientos preventivos del sistema, los servicios de reparación que requiera y la limpieza del mismo, ya que son necesarios para asegurar un buen funcionamiento del sistema de bombeo.

Tabla XXV. **Costo de mantenimiento del sistema de recuperación**

Costo de mantenimiento					
Descripción	Unidad	Costo unitario	Cantidad	Costo total	
				Mes	Año
Mantenimiento preventivo					
Sanitización (cuatrimestral)	Global	Q 150,00	3	Q 37,50	Q 450,00
Cloro en bolsa (mensual)	Kilo	Q 15,00	12	Q 15,00	Q 180,00
Servicio menor preventivo					
Servicio y mantenimiento (semestral)	Global	Q 550,00	2	Q 91,67	Q 1 100,00
Cambio de impulsor (anual)	Global	Q 250,00	1	Q 20,83	Q 250,00
Cambio de cojinetes (anual)	Global	Q 115,00	1	Q 9,58	Q 115,00
Cambio de piezas críticas (anual)	Global	Q 450,00	1	Q 37,50	Q 450,00
Limpieza y revisión					
Enseres limpieza (Cuatrimestral)	Global	Q 200,00	3	Q 50,00	Q 600,00
Total costo mantenimiento				Q 262,08	Q 3 145,00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.1.2. Proveedores

El principal objetivo de este punto es considerar dentro del análisis, para la toma de decisión, un factor financiero que sea determinante para su implementación. A partir de los datos mencionados en el apartado 4.1.1 se puede definir una alternativa de inversión, la cual pueda ser la más confiable para ser desarrollada. Para ello es indispensable contar con proveedores que puedan realizar el trabajo de la fase de ejecución y cierre.

Además, proveer ciertos entregables indispensables que son necesarios para documentación y control del mismo sistema. Con el propósito de considerar la puesta en marcha de este sistema de recaudación de agua en un corto o mediano plazo se contempla tener un valor de costo total sobre la implementación del sistema de bombeo de agua en el mercado actual. Para lograrlo se solicita el apoyo del departamento de mantenimiento para cotizar el sistema, sus fases con todos sus entregables.

4.1.3. Alternativas de inversión

Se contactó con proveedores para cumplir este objetivo, de los cuales se tomó la información de uno en particular, ya que contaba con las competencias requeridas para realizar esta instalación.

Tabla XXVI. **Propuesta de costo del proyecto por fases**

Fase	Descripción	Tiempo de ejecución	Presupuesto
Ingeniería	Visitas técnicas, situación actual de trabajo, planos e ingeniería de diseño.	4 semanas	Q 32 928,00
Ejecución	Instalación de equipos, tuberías y tanques. Lo que sea necesario para su funcionamiento.	9 semanas	Q 91 616,00
Cierre	Pruebas del sistema, entrega de planos y manuales.	2 semanas	Q 0,00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.2. Evaluación de inversión

La evaluación sobre la implementación del sistema de bombeo se realiza por medio de diferentes herramientas o métodos que ayudaron a visualizar la situación financiera del proyecto. Este sistema nuevo impactaría en la planta monetariamente de forma positiva y debería representar un ahorro en el consumo de agua potable, o bien podría ser de manera negativa, al representar un gasto mayor a la empresa. Esta decisión estará fundamentada en torno a un análisis financiero, el cual se puede definir a través de los siguientes apartados.

4.2.1. Flujos de efectivo

Este indicador denota cómo se comportan todos los costos involucrados del proyecto, como los de operación, mantenimiento y el costo de proveedores. Para darnos un panorama en comparación con los ingresos, tomar en cuenta que estos son el agua que deja de producirse, y en su lugar los flujos de rechazo suplirán. Representa el ahorro por la utilización de agua recuperada.

Tabla XXVII. **Flujos de efectivo proyectado en 12 meses**

Tiempo (meses)	Incremento mensual 0,1 %	Costo de operación	Costo de mantenimiento	Costo total (tasa 0,3 %)	Ingresos (tasa 0,05%)
0				Q 124 544,00	Q 0,00
1		Q 1 323,75	Q 262,08	Q 1 585,83	Q 34 850,00
2	1,01	Q 1 336,99	Q 264,70	Q 1 601,69	Q 35 024,25
3	1,01	Q 1 350,36	Q 267,35	Q 1 617,71	Q 35 199,37
4	1,01	Q 1 363,86	Q 270,02	Q 1 633,88	Q 35 375,37
5	1,01	Q 1 377,50	Q 272,72	Q 1 650,22	Q 35 552,24
6	1,01	Q 1 391,27	Q 275,45	Q 1 666,72	Q 35 730,01
7	1,01	Q 1 405,19	Q 278,20	Q 1 683,39	Q 35 908,66
8	1,01	Q 1 419,24	Q 280,99	Q 1 700,22	Q 36 088,20
9	1,01	Q 1 433,43	Q 283,80	Q 1 717,23	Q 36 268,64
10	1,01	Q 1 447,77	Q 286,63	Q 1 734,40	Q 36 449,98
11	1,01	Q 1 462,24	Q 289,50	Q 1 751,74	Q 36 632,23
12	1,01	Q 1 476,87	Q 292,39	Q 1 769,26	Q 36 815,39

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.2.2. Valor presente neto (VPN)

El valor presente neto demuestra que este proyecto, junto con todos los costos que conlleva, es capaz de amortizarse en menos de un año, ya que el valor presente neto es positivo y se eleva a una cantidad de Q 86 771,30. De hecho, siendo exactos a partir del sexto mes el proyecto ya ha sido amortizado y desde este punto los ingresos se convierten en ganancias para la empresa.

Tabla XXVIII. **Valor presente neto hacia 1 año de operación**

Tiempo (meses)	Flujo de fondos netos	Factor al 12 % de actualización	Flujo actualizado
0	-Q 124 544,00	1,0000	-Q 124 544,00
1	Q 33 264,17	0,9259	Q 30 800,16
2	Q 33 422,56	0,7972	Q 26 644,26
3	Q 33 581,67	0,7118	Q 23 902,77
4	Q 33 741,49	0,6355	Q 21 443,32
5	Q 33 902,02	0,5674	Q 19 236,92
6	Q 34 063,28	0,5066	Q 17 257,52
7	Q 34 225,27	0,4523	Q 15 481,77
8	Q 34 387,98	0,4039	Q 13 888,73
9	Q 34 551,41	0,3606	Q 12 459,59
10	Q 34 715,58	0,3220	Q 11 177,49
11	Q 34 880,49	0,2875	Q 10 027,31
12	Q 35 046,13	0,2567	Q 8 995,47
		VPN 12	Q 86 771,30

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.2.3. Tasa interna de retorno (TIR)

Esta medida de evaluación del proyecto representa la rentabilidad del proyecto, en este caso, es una buena aproximación de lo que se quiere alcanzar con este sistema de recuperación. El valor de TIR es de 25 %, resultado del análisis al flujo de fondos netos. Interpretado por la fórmula de Excel TIR (valores, estima), se puede concluir que la tasa de rendimiento del proyecto es superior a la tasa mínima de rentabilidad (12 %) que se requiere de la inversión.

Tabla XXIX. **Tasa interna de retorno valuada en 12 meses**

Tiempo (meses)	Flujo actualizado
0	-Q 124 544,00
1	Q 30 800,16
2	Q 26 644,26
3	Q 23 902,77
4	Q 21 443,32
5	Q 19 236,92
6	Q 17 257,52
7	Q 15 481,77
8	Q 13 888,73
9	Q 12 459,59
10	Q 11 177,49
11	Q 10 027,31
12	Q 8 995,47
TIR 12	25,30 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.2.4. Costo anual equivalente

El análisis del costo anual equivalente (CAE) se define para dar a conocer el flujo exclusivo de costos que tendrá el proyecto durante los próximos 5 años de vida del sistema. En el resultado de esta evaluación se expresa la cantidad en dinero que se debe disponer en el presupuesto del departamento de mantenimiento para mantener las condiciones del equipo, el adecuado funcionamiento del sistema y pagar la inversión inicial del proyecto.

Tabla XXX. **Análisis de costo anual equivalente**

Tiempo (años)	Costo total	Factor al 12 % de actualización	Valor actual de costo
0	Q 124 544,00	1,0000	Q 124 544,00
1	Q 20 112,81	0,8929	Q 18 676,18
2	Q 21 257,23	0,7972	Q 17 623,98
3	Q 22 466,76	0,7118	Q 16 631,05
4	Q 23 745,12	0,6355	Q 15 694,07
5	Q 25 096,22	0,5674	Q 14 809,88
		CAE	Q 57 764,33

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Sin embargo, este análisis no toma en cuenta el ingreso, que en este caso concreto es el costo de producción de agua potable por medio de una bomba desde un pozo, el cual mensualmente asciende a Q 34 850,00. Este monto se vuelve un ahorro cuando el trabajo de producción de agua potable no se realiza; es decir, se vuelve un ingreso. Concluimos que el proyecto se amortiza en menos tiempo y el valor de costo anual promedio disminuye a Q 16 700,00.

4.2.5. Análisis costo beneficio

Este último análisis es para confirmar cómo es el impacto del costo en los ingresos que se espera tener. Algo muy importante por considerar es que se logra mucha diferencia en el análisis de costo/beneficio debido a que se estima aprovechar toda el agua recuperada en un servicio alternativo. Si esto se cumple se logra satisfacer la demanda de agua y se puede amortizar el proyecto en menos de un año, dando como resultado un beneficio bastante importante para la empresa. Si eso no llega a suceder, el proyecto se amortiza en mayor tiempo.

Tabla XXXI. **Análisis de costo beneficio**

Valor actual de ingresos	Q 418 200,00
Valor actual de costos	Q 207 979,00
Costo / beneficio	2,01

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.3. Evaluación ambiental

Debido a que este proyecto implica el aprovechamiento de agua y se trata del principal recurso de trabajo, se expone ciertas consideraciones ambientales del proyecto para crear un efecto positivo a la huella hídrica en este sector.

4.3.1. Posibilidad de impacto al ambiente

La actividad productiva del sistema de agua para inyección genera flujos de rechazo, como anteriormente se expuso. Esto representa un impacto al medio ambiente desde un punto de vista objetivo y se debe considerar que esto, a través del tiempo, tendrá una consecuencia ambiental mínima o elevada; dependerá de la puesta en marcha de proyectos, actividades y acciones que concentran esfuerzos en realizar un aprovechamiento óptimo del recurso hídrico. Específicamente se desea conseguir este resultado con este proyecto, debido a que la recuperación y reutilización de este recurso aporta al crecimiento sostenible de este tipo de producción e incluso evita la extracción de aguas subterráneas.

Además, en este caso se desea impactar de forma negativa al aumento considerable del volumen total de agua utilizado (huella hídrica) para la generación de WFI, un producto con aplicaciones de uso parenteral aprovechado

esencialmente en la industria farmacéutica. También es factible impactar de manera económica, algo que se evidencia en el capítulo anterior. Este caso en concreto se traduce en un ahorro energético y operativo para disminuir la producción de agua potable extraída de un pozo necesario para los distintos servicios internos utilizados en la planta de producción.

4.3.2. Acciones proambiente

Es importante considerar la necesidad de proyectos y acciones que puedan ayudar a generar un impacto positivo y mantener un crecimiento sostenido, pero que a la vez este sea sostenible con la forma de producción en el tiempo. Considerando algunos antecedentes, se presenta unas acciones por considerar para que se lleve a cabo una gestión adecuada.

- Acciones de recuperación de agua
- Control en el consumo de los equipos
- Control de fugas en las líneas de distribución
- Verificación del rendimiento del equipo
- Control de los descartes al drenaje

Implementar ciertos hábitos que promueven el cuidado del medio ambiente refleja el compromiso que la industria tiene con el país, con los clientes que atiende y con su filosofía de bienestar y salud.

5. MEJORA CONTINUA

5.1. Medición y registro

El sistema de bombeo de agua recuperada tendrá un caudal que será aprovechado y destinado a satisfacer la necesidad en cierta área dentro de la planta de producción, como anteriormente se planteó.

5.1.1. Valores de producción

Se debe cuantificar el valor real de agua aprovechada por el sistema. Este valor se controlará por medio del dato entregado por uno de los instrumentos de medición que se contempló anteriormente. El flujómetro considerado dentro del diseño técnico del sistema de bombeo servirá para este propósito en concreto, otorgar datos de consumo de las líneas y del caudal real recuperado que el sistema aprovechará con el propósito de verificar la eficiencia del mismo; esta es la razón del porque su posición dentro del sistema es después del almacenamiento de agua. Este valor de agua recuperada deberá ser el mayor posible; estamos hablando de consumir 13 m³ durante el día en servicios alternos para sacar el mejor partido al sistema y a la inversión realizada.

5.1.2. Indicadores de trabajo

El sistema está diseñado para trabajar con ciertos parámetros técnicos y características fisicoquímicas. Está dispuesto así por el análisis llevado a cabo particularmente en este tipo de industria, tomando en consideración la mecánica de fluidos para su correcto funcionamiento, operación y control. Es por este

motivo que los parámetros de trabajo para este sistema son los siguientes, con base en la normativa para agua potable presentada en COGUANOR.

Tabla XXXII. **Características técnicas de operación del sistema**

Característica	Parámetro de trabajo	
	Mínimo	Máximo
Presión en las líneas de distribución (switch de presión)	20 PSI	40 PSI
Calibración de hidroneumáticos	18 PSI	18 PSI
Manómetros	20 PSI	40 PSI
Temperatura	20 °C	45 °C
Caudal	3 m ³ /h	6 m ³ /h

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXXIII. **Características fisicoquímicas de operación del sistema**

Característica	Parámetro de trabajo	
	Mínimo	Máximo
Conductividad	100 µS/cm	750 µS/cm
Cloro libre residual	0,9 mg/L	1,2 mg/L
Dureza total del agua	0 mg/L	250 mg/L
Sólidos totales disueltos	0 mg/L	250 mg/L
Potencial de hidrógeno	6,5	8,5
Cloruros	0 mg/L	250 mg/L

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

5.1.3. Formatos de registro

Los formatos de registro tienen el propósito de llevar un control y supervisar los parametros más importantes del sistema de recuperación. De esta forma intervenir si el sistema lo requiere.

Figura 38. Registro de producción de agua recuperada

LOGO	REGISTRO DE PRODUCCIÓN DE AGUA RECUPERADA	CODIGO
		Fecha emisión:
		Versión: 00

Mes / Año : _____

FECHA	HORA		CONTADOR		CANTIDAD RECUPERADA (m³)	REALIZADO POR
	INICIO	FINAL	INICIO	FINAL		

...

TOTAL	
--------------	--

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

El analisis de los flujos de agua rechazada deben siempre pasar por un control de calidad. Pueden haber variaciones en los resultados del análisis, esto determina que se debe intervenir en el sistema para volver nuevamente a los parametros mínimos de agua potable con temperatura media para poder ser distribuidas a los puntos de servicio.

Figura 39. **Registro de análisis de agua recuperada**

LOGO	LISTA DE VERIFICACIÓN DEL EQUIPO	CODIGO
		Fecha emisión:
		Versión: 00

Fecha: _____ Hora: _____

Análisis	Condiciones		Resultado	Cumple (Si/No)	Observaciones
	Dimensional	Especificación			
Conductividad	µS/cm	< 750			
pH	Adimensional	6,5 - 8,5			
TDS	ppm	< 250			
Dureza	ppm	< 250			
Cloruros	ppm	< 250			
Cloro libre residual	mg/L	0,5 - 1			
Temperatura	°C	< 45			

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

5.2. **Mantenimiento de equipos**

Es un hecho que este sistema deberá ser atendido por el personal del departamento para su operación, revisión y control periódico, para mantener las condiciones óptimas del equipo que lo integra y prolongar su vida útil.

5.2.1. **Manejo y uso**

El manejo de este sistema debe ser por personal autorizado debido a que pueden ocasionarse daños o errores de configuraciones que puedan alterar la operatividad del equipo. A continuación, se detallan las siguientes condiciones para un correcto funcionamiento:

- Utilizar cuando el sistema de producción de agua para inyección esté encendido. De lo contrario, se deberá apagar el sistema de recuperación de agua porque trabajaría en seco y ocasionaría daños al equipo.
- No deberá encenderse o utilizar el sistema de recuperación cuando el sistema principal de producción WFI se encuentre en sanitización. Se incurre en riesgos hacia el equipo instalado, debido a las altas temperaturas.
- Asegurarse dosificar hipoclorito de sodio para mantener las características químicas de operación del agua. Se aplica como medida de precaución para el personal que opera el sistema.
- Verificar la presión del hidroneumático; si no es la correcta, el equipo podría estar dañado y se debe dar mantenimiento.
- No dejar en marcha el sistema de recuperación durante las noches, sin supervisión; podría ocasionarse daños en el equipo.
- Para seguir almacenando agua recuperada debe haber un consumo de la misma al iniciar actividades productivas que utilicen la misma. Es decir, que el tanque de almacenamiento esté vacío, si no, el flujo recuperado se descartará.
- Que el switch de presión (presostato) funcione adecuadamente a la presión calibrada. Si no es así, no se tendrá un flujo con suficiente presión en las tuberías de distribución.

5.2.2. Controles

Es necesario tener un control de los parámetros mencionados y asegurarse de cumplir con las condiciones iniciales para establecer el correcto funcionamiento del sistema y de esta forma controlar alguna variable que se pueda salir de los parámetros de trabajo o condiciones establecidas.

5.2.3. Inspecciones y auditorías

El proceso de auditorías internas es muy exigente y estricto en relación con los controles y el proceso de operación que debe tener un sistema para su apropiada gestión. Por ello, es importante seguir una serie de pasos para cuidar las condiciones del sistema de recuperación.

- El técnico de turno debe cerciorarse de estar cumpliendo las condiciones iniciales de operatividad mencionadas en el apartado 5.3.1.
- El técnico de turno debe realizar una inspección diaria al iniciar operaciones para determinar el buen funcionamiento del sistema.
 - Verificar que las presiones en los manómetros y equipos estén dentro de los parámetros para operar el sistema.
 - Llenar el formato de registro de los litros de agua recuperados al momento, a partir de la lectura del flujómetro.
 - Recolectar las muestras de agua que serán utilizadas en el proceso de análisis de agua recuperada, cuando sea el caso.

- Realizar el control de los equipos periódicamente para determinar el mantenimiento correspondiente al equipo.

5.3. Servicio de agua

Es una posibilidad ampliamente recomendada que la empresa pueda implementar este tipo de agua a otras áreas; es decir, expandir el alcance del sistema dentro de la planta, ya que existe el posible aumento de producción de este tipo de agua rechaza si la producción de WFI incrementa. Ahora bien, si el aprovechamiento de este tipo de agua incrementa, no solo se ayuda al medio ambiente sino crea una cultura de producción sustentable y amigable con el medio ambiente.

5.3.1. Plan alternativo

El alcance de este proyecto puede ampliarse a otras áreas dentro de los mismos servicios, incluso dentro de servicios alternos actuales o que tengan planificados para un futuro, considerando que es una opción factible de realizar. Las posibles ampliaciones recomendadas para este proyecto son:

- Incrementar los puntos de servicio de agua recuperada utilizada para servicios sanitarios. Actualmente el proyecto contempla ciertas áreas de sanitarios en donde se equilibra la demanda y la oferta de agua. Sin embargo, es posible ampliar el alcance si hay nuevas instalaciones hacia otros sanitarios dentro de la planta.
- El área de calderas es uno de los principales puntos de uso de este tipo de agua. Si disminuye en producción de vapor, también disminuye su requerimiento de agua. Una opción factible es buscar algún otro equipo en

donde también esté la posibilidad de utilizar este tipo de agua, como los autoclaves.

- Ampliar el requerimiento de agua del área de lavandería. Se contempla el uso de agua recuperada para el edificio principal de lavandería, pero existen algunas otras áreas más pequeñas que también hacen trabajos de lavandería y que en el planteamiento actual no se tomaron en cuenta y se podrían considerar en una posible ampliación.

CONCLUSIONES

1. Se realizó el diagnóstico del sistema de tratamiento de agua para inyección y se establecieron aquellos flujos rechazados que son relevantes en cada una de las operaciones. Algunos de estos generan flujos de rechazo de forma constante como la ósmosis y otros lo hacen de forma intermitente como el termocompresor.
2. La principal causa de la generación de estos flujos de rechazo es el incumplimiento de las especificaciones de calidad de agua para inyección y según la etapa en la que se encuentre será en mayor o menor cantidad. Otras causas son las sanitizaciones y mantenimiento que se debe efectuar para mantener las condiciones óptimas en el equipo; estas se realizan periódicamente y no son representativas en cuanto a cantidad de flujo rechazado.
3. La caracterización de los diferentes flujos de rechazo que genera el sistema fue crucial para determinar las posibles soluciones y áreas adecuadas para el proceso de distribución. Con base en el histórico de uso de agua potable en la planta de producción y con la premisa que la calidad mínima deber ser potable para distribuir este flujo rechazado, se concretaron ciertas áreas como puntos de utilización. Algunas de estas áreas son calderas, servicio sanitario, lavandería, mantenimiento de áreas verdes o reingresarla como agua potable hacia un tanque de almacenamiento, independientemente el área de utilización.

4. Las mejores opciones fueron especificadas en el siguiente orden; la primera de ellas y la mejor es para alimentar el área de calderas. Este tipo de flujo de agua carece de dureza, por lo que mejora considerablemente la producción de vapor a toda la planta, ya que el sistema optimiza recursos en desechar dureza del agua anteriormente utilizada. La segunda, para alimentar las lavadoras de la planta, ya que el tipo de detergentes utilizados en esta área mejoran su rendimiento cuando se trata de agua sin dureza. La tercera, agua para alimentar los sanitarios y mingitorios; esta es una opción muy viable debido a que no sería necesario un tratamiento posterior. Por último, como soporte para el mantenimiento de áreas verdes en la planta.

5. Para la realización de este proyecto se propone la inversión total de Q 124 544,00. Este dinero se asignará para la adecuación del sistema dentro de la planta de producción y propiamente el aprovechamiento de los flujos de agua rechazada para distribuirlos a las diferentes áreas. También será utilizado para la compra del equipo especializado necesario. Este proyecto supondría un tiempo de amortización de 7 meses.

6. El aprovechamiento óptimo del recurso hídrico aporta de manera significativa al crecimiento sostenible de este tipo de industria. La extracción mínima de aguas subterráneas impacta de forma positiva económicamente y refleja el compromiso de esta industria con el cuidado del medio ambiente.

RECOMENDACIONES

1. Efectuar periódicamente un muestreo de los flujos de rechazo para controlar las especificaciones de salida del agua rechazada por medio del recolector.
2. Controlar el incremento del volumen de agua rechazada por el sistema WFI. Esto denotará que el sistema disminuye su rendimiento o que aumentó la producción.
3. El agua recuperada debe ser controlada para que mantenga las especificaciones mínimas de agua potable. Para ello se debe realizar muestreos de aceptación de los parámetros establecidos.
4. Debido al crecimiento en la producción de agua para inyección que se tiene contemplado, se debe considerar otras áreas de distribución del agua recuperada, o bien seguir distribuyendo hacia los mismos servicios pero aumentar su rango de alcance hacia otros edificios.
5. Realizar el proyecto en dos fases: la primera para alimentar las áreas de calderas y de sanitarios. Luego en la segunda fase, realizar las derivaciones necesarias para satisfacer los otros puntos de uso.
6. Es posible adaptar algunas ampliaciones al proyecto de tal forma que pueda utilizarse todos los flujos de agua rechazada recuperados por medio del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

1. AQUASISTEMAS, *Productos de bombeo*. [en línea] <www.aquasistemas.com.gt/productos> [Consulta: 5 de abril de 2019]
2. Comisión Guatemalteca de Normas, Ministerio de Economía. *Norma Técnica Guatemalteca, COGUANOR NTG-29001. Características de agua para consumo humano*. Adoptada Consejo Nacional de Normalización, 2013. 12 p.
3. DÍAZ OVIEDO, Jhon Jairo. *Diseño de un sistema de tratamiento y reutilización del agua de la lavadora aplicado a los hogares de Bogotá D.C.* Trabajo de graduación de Ing. De Producción. Facultad de Ingeniería. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, 2016. 98 p.
4. ESTRADA MURALLES, Ana Lucía. *Estudio técnico de validación del sistema de tratamiento de agua purificada grado farmacéutico, en un laboratorio farmacéutico*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Rafael Landívar, 2012. 119 p.
5. GDN Water Treatment, *Generalidades de funcionamiento sistema WFI*. Págs. 24-40. [en línea] <www.pharmacompass.com/jAssets/pdf/party/GDN-SRL-1491306612.pdf> [Consulta: 25 de noviembre de 2018]

6. Ministerio de Salud Pública, Departamento de regulación y control de productos farmacéuticos y afines. *Agua para uso farmacéutico*, Republica de Guatemala, 2012. 45 p.
7. MOTT, Robert. *Mecánica De Fluidos*, 7a ed. México, Pearson, 2015. 556 p.
8. Pedrollo. *Catálogo general 60 HZ*, edición actualizada, Italia, 2014. 364 p. [en línea] <www.pedrollo.com> [Consulta: 16 de marzo de 2019]
9. POCOCK Gillian, RICHARDS Christopher. *Fisiología humana: La base de la medicina*. 2a ed. Oxford, Masson, 2005. 736 p.
10. SAMAYOA GALLARDO, Luis Pablo. *Diseño y construcción de equipo para purificación de agua a bajo costo*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013. 156 p.
11. Secretaría de Salud, Comisión permanente de la Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos. *Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos (FEUM)*, 10a ed. México: 2011. 183 p.