REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Universidad Católica de Santa María
Escuela de Postgrado
Maestría en Planificación y Gestión Ambiental

SISTEMA HIDRÁULICO FUNCIONAL PARA REUTILIZACIÓN DE AGUAS GRISES RESULTANTES DE MÁQUINAS DE LAVADO EN UNIDADES RESIDENCIALES, AREQUIPA, PERÚ

Tesis presentada por el Bachiller:
Benavente Morales, Antonio Edwin
Para optar el Grado Académico de
Maestro en Planificación y Gestión Ambiental

Asesor:
Dr. Alcázar, Rojas, Hermann Enrique

Arequipa – Perú
2023

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ESCUELA DE POSTGRADO

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR DE TESIS

Arequipa, 05 de Diciembre del 2023

Dictamen: 005717-C-EPG-2023

Visto el borrador del expediente 005717, presentado por:

2015010911 - BENAVENTE MORALES ANTONIO EDWIN

Titulado:

SISTEMA HIDRÁULICO FUNCIONAL PARA REUTILIZACIÓN DE AGUAS GRISES RESULTANTES DE MÁQUINAS DE LAVADO EN UNIDADES RESIDENCIALES, AREQUIPA, PERÚ

Nuestro dictamen es:

APROBADO

29388008 - TICSE VILLANUEVA EDWING JESUS
DICTAMINADOR

29278441 - PACHECO OVIEDO ABRAHAM ARTURO
DICTAMINADOR

29440909 - MOLINA RODRIGUEZ FREDY NICOLAS
DICTAMINADOR

SISTEMA HIDRÁULICO FUNCIONAL PARA REUTILIZACIÓN DE AGUAS GRISES RESULTANTES DE MÁQUINAS DE LAVADO EN UNIDADES RESIDENCIALES, AREQUIPA, PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%	6%	1%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	www.oecd-ilibrary.org Fuente de Internet	3%
2	repo.sibdi.ucr.ac.cr:8080 Fuente de Internet	1%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
4	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	repositorio.ug.edu.ec Fuente de Internet	1%
6	repository.ugc.edu.co Fuente de Internet	1%

Excluir citas	Apagado	Excluir coincidencias	< 1%
Excluir bibliografía	Apagado		

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

DEDICATORIA

A mi esposa Carola por hacerme describir
su afán por ahorrar el agua, aun cuando
aparentemente no es necesario.
Mujeres así, cambian el mundo.

A mi hermano Juan.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

AGRADECIMIENTOS

A mis hijos, Alejandro y José Antonio, por su cariño y su paciencia.

Más allá de sus irreverencias, sus idas y venidas, sé que finalmente encontrarán su rumbo.

Gracias Hermann.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ÍNDICE

Pág.

DEDICATORIA iii

AGRADECIMIENTOS iv

ÍNDICE v

ÍNDICE DE TABLAS viii

ÍNDICE DE FIGURAS ix

ABREVIATURAS xi

RESUMEN xii

ABSTRACT xiii

INTRODUCCIÓN 1

HIPÓTESIS 5

OBJETIVOS 6

Capítulo 1 7

1. MARCO TEÓRICO 7

1.1 Estado del arte 7

1.1.1 Origen del agua en la Tierra 7

1.1.2 Disponibilidad de agua en el planeta 8

1.1.3 Problemática del agua 9

1.1.4 El agua en el Perú 9

1.1.5 Beneficios ambientales y económicos del reciclaje del agua 11

1.1.6 Procesos de reciclaje de agua 12

1.1.7 Caracterización de las aguas grises y aguas negras 19

1.1.8 Contaminación de cuerpos de agua naturales en el Perú 24

1.2 Estimación del uso de agua en una vivienda por minuto 26

1.2.1 Estimación del consumo de agua por persona 26

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

1.2.2 Estimación del consumo de agua en una familia promedio de 5 miembros 27

1.3 Plan de ahorro de agua para una familia de 5 miembros 27

1.4 Tecnologías y experiencias en reutilización de aguas grises 28

1.4.1 Uso de recursos hídricos alternativos 28

1.4.2 Procesamiento de aguas grises vinculado basado en el estilo arquitectónico 29

1.4.3 Optimización de la Sustitución Parcial de Agua Potable 30

1.4.4 Desafíos en la Reutilización de Aguas Grises 31

1.4.5 Análisis de Investigaciones Previas 31

Capítulo 2 33

2. METODOLOGÍA 33

2.1 Proceso de diseño y desarrollo 34

2.2 Estudio Documental 35

2.2.1 Diseño de la etapa de documentación: 35

2.2.2 Estrategias de búsqueda de la información 35

2.2.3 Planteamiento de los criterios de inclusión y exclusión 36

2.2.4 Extracción de datos 36

2.2.5 Análisis de la información 36

2.3 Diseño del prototipo funcional de sistema hidráulico para la reutilización de aguas grises 37

2.3.1 Especificaciones de acuerdo a VDI 2221 37

2.3.2 Estructura de funciones 38

2.3.3 Matriz morfológica 39

2.3.4 Conceptos de solución 41

Alternativa 1 41

Alternativa 2 42

2.4 Diseño de componentes del sistema hidráulico de reutilización de aguas grises provenientes de máquina de lavado 42

2.4.1 Bomba Centrífuga 43

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Ecuación ideal de Bernoulli 44

2.4.2 Tanque tina Rotoplas 44

2.4.3 Control de nivel tipo boya 45

2.4.4 Electroválvulas 46

2.4.5 Válvulas antirretorno 47

2.4.6 Interruptores termomagnéticos 47

2.4.7 Interruptor eléctrico 48

2.4.8 Transformadores 49

2.4.9 Cable eléctrico (calibre 16) 49

2.4.10 Tuberías PVC 50

2.5 Diagrama del prototipo de sistema hidráulico para reutilización de aguas grises .. 51

2.6 Diseño del circuito eléctrico base del tablero de control 52

2.7 Cálculo para la selección de la bomba 56

2.8 Propuesta económica para la construcción del sistema hidráulico 61

Capítulo 3 63

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 63

3.1 Valoración técnico-económica 63

3.2 Discusión de los Resultados 65

CONCLUSIONES 70

RECOMENDACIONES 71

REFERENCIAS 73

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 2.1 Lista de requerimientos en la norma VDI 2121 37

Tabla 2.2 Curva del sistema. 58

Tabla 2.3 Ficha técnica de una bomba de 0,5 HP. 59

Tabla 2.4 Cálculo de costos incorporando dos bombas periféricas. 61

Tabla 2.5 Cálculo de costos incorporando una sola bomba periférica. 62

Tabla 3.1 Evaluación Técnica 64

Tabla 3.2 Evaluación económica 64

Tabla 3.3 Consumo de agua potable en función de los ciclos del lavado 65

Tabla 3.4 Consumo de agua potable en función de la frecuencia de lavado completo de una lavadora 66

Tabla 3.5 Volumen de ahorro de agua potable por reutilización de agua gris 66

Tabla 3.6 Volumen de ahorro de detergente por reutilización de agua gris 67

Tabla 3.7 Cantidad de lavadoras vendidas por período por regiones del Perú 67

Tabla 3.8 Consumo de agua potable en función de la cantidad de lavadoras compradas en Arequipa 68

Tabla 3.9 Consumo de agua potable en función de la cantidad de lavadoras compradas en el Perú 69

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.1 Distribución de agua en la Tierra 8

Figura 1.2 Aguas residuales descargadas a la red de alcantarillado en Lima 25

Figura 1.3 Agua residual generada a diario por persona en cada región del Perú 25

Figura 1.4 Aguas residuales que procesan Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento 26

Figura 1.5 Sistema convencional de tratamiento de aguas grises 29

Figura 2.1 Etapas del proceso de diseño según la norma alemana VDI 2221 34

Figura 2.2 Estructura de funciones 39

Figura 2.3 Matriz morfológica 41

Figura 2.4 Bomba centrífuga simple. 43

Figura 2.5 Funcionamiento de una bomba centrífuga 44

Figura 2.6 Tanque tina Rotoplas 250 L. 45

Figura 2.7 Control de nivel tipo boya. 46

Figura 2.8 Electroválvula de 24 V. 46

Figura 2.9 Válvula Check. 47

Figura 2.10 Interruptor termomagnético. 48

Figura 2.11 Interruptor eléctrico. 48

Figura 2.12 Transformador de tensión. 49

Figura 2.13 Cable eléctrico (calibre 16) 50

Figura 2.14 Tubos PVC para instalaciones sanitarias 51

Figura 2.15 Sistema hidráulico para reutilización de aguas grises 51

Figura 2.16 Circuito eléctrico del tablero de control del sistema hidráulico 52

Figura 2.17 Electroválvula 1 conmutada 53

Fuente: (Equipo Hidro), Caracela, Álvarez, Yapo, Conza, 2021. 53

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 2.18 Electroválvula 2 conmutada 54

Figura 2.19 Sensor de nivel 1 conmutado 54

Figura 2.20 Sensor de nivel 2 conmutado 55

Figura 2.21 Diagrama unifilar 56

Figura 2.22 Diagrama curvas y datos de rendimiento 60

Figura 3.1 Evaluación técnico-económica 65

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ABREVIATURAS

Abreviaturas

ALICIA	Acceso Libre a la Información Científica
APA	American Psychological Association
CITAVI	CITÉ, gestor de referencias bibliográficas y del conocimiento
ECA	Estándares de Calidad Ambiental
EPS	Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento
FAO	Food and Agriculture Organization
LMP	Límites Máximos Permisibles
NCEI	National Centers for Environmental Information
NOM	Natural Organic Matter
OEFA	Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental
OMS	Organización Mundial de la Salud
PBI	Producto Bruto Interno
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
UV	Ultravioleta
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

RESUMEN

El estudio se orientó al diseño e implementación de un prototipo funcional de sistema hidráulico para la reutilización de aguas grises las que, luego del ciclo de lavado, usualmente son liberadas al alcantarillado como efluentes de máquinas lavadoras de ropa. Al efecto, luego de la contextualización del problema de estudio, circunscrito en el ejercicio de la economía circular, en la visión de que algunos desechos pueden considerarse como recursos, se empleó la metodología de diseño basada en la norma alemana VDI 2221, que contempla, las especificaciones a través de una lista de requerimientos, la estructura de funciones, la matriz morfológica, el planteamiento de los conceptos de solución, el diseño de componentes, los cálculos, la construcción del prototipo y la implementación para probar su funcionamiento. Se construyó e instaló un prototipo funcional con recursos de costo moderado, el que fue sometido a pruebas para observar su funcionamiento, logrando el almacenamiento y reúso de efluentes en el orden del 30 al 60% de volumen total por ciclo de lavado, que en una lavadora convencional de 17 Kg. permite reusar 180 litros de los 270 que usualmente se emplean en el ciclo completo. Es claro que, con una inversión razonable, que tiene una tasa de retorno de hasta dos años, puede ahorrarse un importante volumen de agua potable (huella hídrica) y se reduce igualmente la facturación mensual por este concepto. Finalmente, se concluye que es viable construir e instalar un prototipo para almacenar y reutilizar el agua potable con recursos y mano de obra locales.

Palabras Clave: máquina lavadora, agua recirculada, agua gris, reciclado de aguas residuales.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ABSTRACT

The study was aimed at the design and implementation of a functional prototype of a hydraulic system for the reuse of gray water which, after the washing cycle, is usually released into the sewer as effluent from clothes washing machines. To this end, after contextualizing the study problem, limited to the exercise of the circular economy, in the view that some waste can be considered as resources, the design methodology was used based on the German standard VDI 2221, which contemplates, the specifications through a list of requirements, the structure of functions, the morphological matrix, the approach to solution concepts, the design of components, the calculations, the construction of the prototype and the implementation to test its operation. A functional prototype was built and installed with moderate cost resources, which was subjected to tests to observe its operation, achieving the storage and reuse of effluents in the order of 30 to 60% of the total volume per washing cycle, which in a 17 kg conventional washing machine allows you to reuse 180 liters of the 270 that are usually used in the complete cycle. It is clear that, with a reasonable investment, which has a return rate of up to two years, a significant volume of drinking water can be saved (water footprint) and the monthly billing for this concept is also reduced. Finally, it is concluded that it is viable to build and install a prototype to store and reuse drinking water with local resources and labor.

Keywords: Washing machine, recycled water, greywater recycling, waste water recycling

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

INTRODUCCIÓN

"Cuando el pozo está seco, sabemos el valor del agua" (Benjamin Franklin).

El volumen global de agua dulce en nuestro planeta, la Tierra, excede las necesidades humanas, pero está asimétricamente distribuido. Del total de recursos hídricos de la Tierra, aproximadamente el 97% se halla en los océanos, mientras que solo el 3% restante está disponible como agua dulce. Sin embargo, de ese 3%, se calcula que solo el 1% está disponible para satisfacer las demandas humanas. (National Centers for Environmental Information [NCEI], 2020)

La distribución desigual del agua, tanto en términos geográficos como temporales, hace que abunde en algunas regiones como la amazonia y escasee en territorios como el nuestro, Arequipa, se localiza en la cabecera del desierto más seco del mundo, Atacama. Muchas partes del planeta se ven afectadas por una grave escasez de agua, provocada por la explotación excesiva de los recursos hídricos que gradualmente los agota y los altos niveles de contaminación del agua dulce debido a la influencia humana. Actualmente, se estima que aproximadamente 800 millones de personas tienen una carencia significativa de agua, y se prevé que esta cifra aumente a 3 mil millones para el año 2025. (Hanjra y Qureshi, 2010)

El avance de la urbanización en zonas antes despobladas, la industrialización y el aumento de la población han propiciado una creciente demanda del líquido vital. No obstante, surge la interrogante sobre si los recursos hídricos existentes podrán satisfacer de manera sostenible estas necesidades. Abordar estos desafíos requiere plantear intervenciones y estrategias efectivas. En este contexto, resulta relevante considerar la reutilización de aguas grises como una posible solución.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Las aguas grises se describen como aguas residuales que no incorporan ninguna mezcla o aporte del sistema del inodoro, (Casanova et al., 2001). Se trata de aguas residuales que cuentan con un gran volumen y una baja concentración de contaminantes, lo que las convierte en una opción muy prometedora para su reutilización y múltiples aplicaciones. La composición de las aguas grises varía y está influenciada por el estilo de vida, el entorno climático y las condiciones locales, (Abedin y Rakib, 2013).

La práctica de reutilizar aguas grises tiene raíces históricas y aún persiste, especialmente, en regiones que enfrentan escasez de agua. Cuando se le otorga la atención debida, esta práctica tiene el potencial de reducir la dependencia excesiva de fuentes de agua dulce y mitigar la contaminación resultante de la liberación sin tratamiento de aguas grises en cuerpos de agua.

Las aguas grises recicladas pueden emplearse en diversas actividades, tanto para usos potables como no potables, como la descarga de inodoros y la agricultura. No obstante, las principales inquietudes relacionadas con la reutilización de aguas grises han girado en torno a problemas de percepción de la salud pública y a la disponibilidad de tecnología adecuada para implementar esta opción, (Vigneswaran, 2004, p. 1).

La reutilización de aguas grises se ha considerado un enfoque confiable para garantizar la seguridad hídrica en comparación con otras técnicas de obtención, como la recolección de agua de lluvia. La cantidad de aguas grises generadas en un hogar puede variar significativamente, desde tan solo 15 litros por persona al día en áreas con recursos limitados, hasta varios cientos de litros. Las razones detrás de estas amplias disparidades se atribuyen principalmente a la ubicación geográfica, el estilo de vida, las condiciones climáticas, el tipo de infraestructura, la cultura y los hábitos, entre otros factores.

Las aguas grises constituyen hasta el 75% del total de aguas residuales producidas en viviendas, y este porcentaje puede elevarse a aproximadamente el 90% si se emplean inodoros secos, (Hernández Leal et al., 2010, p. 155). También se ha calculado que las aguas grises generadas constituyen aproximadamente el 69% del uso total de agua en entornos domésticos, (Jamrah et al., 2008).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos

En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

En un estudio reciente López Ramos (2022), señala que las condiciones medioambientales y el rápido crecimiento demográfico en la provincia de Arequipa ejercen presión sobre la cuenca hidrográfica del río Chili, que a la actualidad muestra una disponibilidad de agua de menos de 1000 metros cúbicos por habitante al año, lo que, dadas las condiciones de estrés hídrico, puede considerarse como una escasez de agua y esta realidad demanda acciones. En ese contexto se plantea como propósito de esta investigación, crear e implementar una solución que permita aprovechar las aguas residuales generadas por las lavadoras domésticas. Esto incluye definir los estándares técnicos para un sistema hidráulico con ese propósito, estimar la cantidad de agua que se puede conservar y desarrollar un sistema de reutilización de agua adecuado para su implementación en el entorno local.

Las interrogantes que demanda responder el estudio son:

¿Cómo se puede implementar una solución para la reutilización de aguas grises provenientes del desagüe de máquinas de lavado?

¿Cuáles son las características técnicas para la construcción de un sistema hidráulico para reutilizar aguas grises efluentes de lavadoras?

¿Es significativo el volumen de aguas grises que se puede ahorrar en cada ciclo de lavado vía su reutilización?

¿Es técnica y económicamente viable la construcción de un sistema para la reutilización de aguas grises?

Justificación

La importancia de ahorrar agua que sale de las lavadoras domésticas en tiempos de creciente escasez hídrica es significativa por varias razones:

Por la conservación de recursos naturales, en tanto el agua dulce es un recurso escaso y esencial para la vida. En muchas regiones, la demanda de agua supera la oferta, lo que lleva a la sobreexplotación de fuentes de agua dulce. Al ahorrar agua en el hogar, especialmente durante actividades cotidianas como lavar la ropa, contribuye a la conservación de este recurso.

Por la reducción de costos, dado que, al utilizar menos agua en las lavadoras, los hogares también pueden reducir sus facturas de agua y energía. Esto no solo beneficia a los

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

consumidores al ahorrar dinero, sino que también reduce la presión sobre la infraestructura de suministro de esos recursos.

Menos estrés en fuentes de agua locales, sabiendo que la excesiva extracción de agua de fuentes naturales puede agotar acuíferos y ríos, lo que tiene un impacto negativo en los ecosistemas acuáticos locales. La conservación del agua contribuye a la salud y el equilibrio de estos sistemas.

Mitigación del cambio climático, toda vez que el proceso de purificación y distribución del agua potable requiere energía, lo que a menudo proviene de fuentes generadoras de energía que emiten gases de efecto invernadero (central termoeléctrica de Chilina). Al ahorrar agua, también se reduce la huella de carbono asociada con su suministro y el tratamiento de aguas residuales.

Preparación para la escasez futura, a medida que las poblaciones crecen y el cambio climático amenaza con agravar la carencia de agua en muchas regiones, es fundamental adoptar prácticas de uso sostenible del agua. El ahorro de agua en las lavadoras es una forma sencilla pero efectiva de prepararse para un futuro con recursos hídricos limitados.

Finalmente, por la educación y concienciación ambiental, al fomentar el ahorro de agua en el hogar a través de actividades, como la gestión eficiente de las lavadoras, también puede contribuir al pensamiento colectivo sobre la importancia de su conservación y promover cambios de comportamiento más amplios en la sociedad.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos

En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

HIPÓTESIS

Dado que el volumen de aguas grises que descarga una lavadora doméstica, luego de completar el ciclo de lavado, es considerable y se pierde como efluente en el sistema de alcantarillado.

Es probable que el diseño y construcción de un sistema hidráulico, permita el ahorro del agua a través de la reutilización de los efluentes del lavado, siendo esta, una alternativa técnicamente viable para reducir la huella hídrica y contribuir al cuidado ambiental.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

OBJETIVOS

Objetivo General

- Diseñar e implementar un prototipo de sistema hidráulico para la reutilización de aguas grises efluentes de máquinas de lavado.

Objetivos Específicos

- Determinar las características técnicas para la construcción local de un sistema hidráulico a emplearse en la reutilización de aguas grises.
- Estimar el volumen de aguas grises que puede reutilizarse en cada ciclo de lavado y el volumen de agua potable que se ahorra en este proceso.
- Establecer la viabilidad técnica y costos de la construcción de un sistema hidráulico para la reutilización de aguas grises.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Capítulo 1

1. MARCO TEÓRICO

En atención al propósito del presente estudio, es que se toma en consideración el siguiente marco teórico y conceptual.

1.1 Estado del arte

1.1.1 Origen del agua en la Tierra

Nuestro planeta es el único que cuenta con agua en estado líquido en su superficie, una condición esencial para explicar el surgimiento de la vida en él. No obstante, el origen del agua en la Tierra ha sido objeto de diversas teorías a lo largo del tiempo. Se ha planteado si el agua estuvo presente en los materiales y estructuras que dieron forma a nuestro planeta desde el principio, si llegó posteriormente a la superficie a través de cometas y asteroides que colisionaron en las primeras etapas de su formación, o si una combinación de ambas circunstancias fue responsable de su presencia. (Rodríguez, 2020)

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Investigaciones recientes indican que el agua ha estado presente desde el inicio en las rocas conocidas como condritas estáticas, que datan de hace unos 4600 millones de años, cuando se formó el planeta. Las rocas más antiguas poseían más del triple de la cantidad de agua que tenemos en nuestros océanos en la actualidad. Por lo tanto, es probable que la Tierra haya adquirido la mayor parte de su agua de los propios materiales que la constituyen. (Piani et al., 2020)

1.1.2 Disponibilidad de agua en el planeta

A nivel global, la cantidad total de agua se estima en 1400 millones de km^2, pero solo el 2.5% de esta cifra corresponde a agua dulce, equivalente a 35 millones de km^2. Esta proporción revela una disponibilidad limitada de agua dulce para satisfacer las necesidades de la población. La mayor parte del agua dulce se encuentra en glaciares, aguas subterráneas, lagos y ríos (ver Figura 1.1). En contraste, menos de la mitad (45,000 km^3) de la precipitación pluvial anual (119,000 km^3) se gestiona a través de embalses, lagos, cursos de agua y acuíferos, mientras que el resto, es decir, 74,000 km^3, se evapora. De los 45,000 km^3 de agua que permanecen en el suelo y subsuelo, solo entre 9000 y 14,000 km^3 son económicamente utilizables, debido a factores como los estiajes que ocurren en ciertas regiones (FAO, 2002).

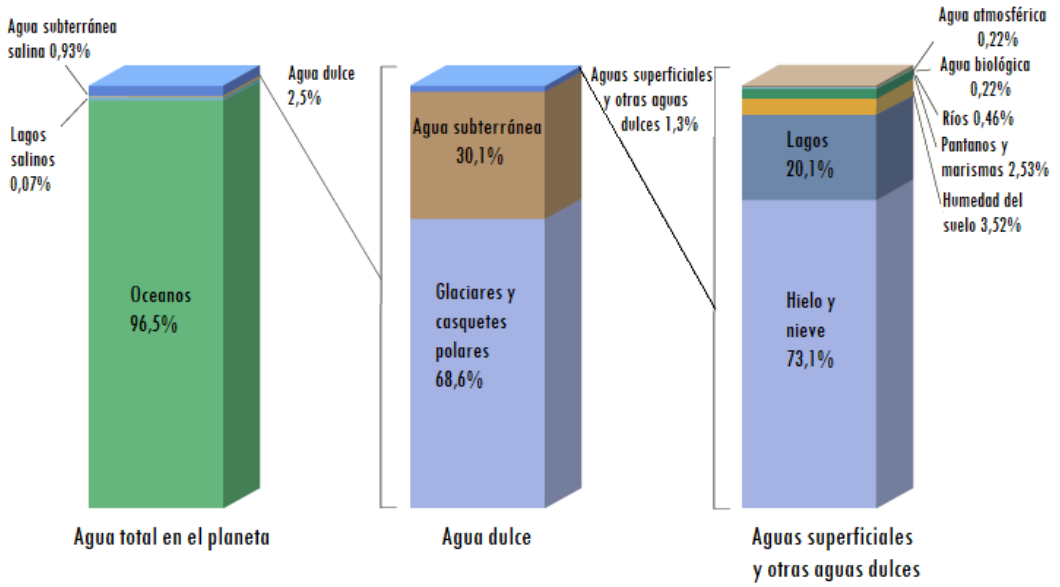


Figura 1.1 Distribución de agua en la Tierra

Fuente: Igor Shiklomanov's capítulo "World Fresh Water Resources" en Agua en Crisis: Guía de los recursos mundiales de agua dulce, Gleick (editor), 1993

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

1.1.3 Problemática del agua

La disponibilidad de agua dulce en la Tierra es limitada y se ve afectada por el cambio climático y la contaminación, lo que compromete su acceso confiable y sus diversas aplicaciones. En la actualidad, aproximadamente la mitad de la población mundial, es decir, cuatro mil millones de personas, enfrenta escasez de agua grave durante al menos un mes al año, con 500 millones experimentando una escasez continua. Unos 4.200 millones carecen de saneamiento, 2.200 millones no tienen acceso a agua potable segura, y se prevé que 700 millones podrían ser desplazados, siendo 250 millones solo en África, debido a la escasez de agua para el año 2030. A pesar de estos desafíos, hay soluciones disponibles.

Mejorar la gestión, conservación y protección del agua puede generar un impacto positivo en la calidad de vida. Una gestión más eficiente de este recurso valioso puede actuar como un catalizador para garantizar que nadie quede rezagado en comunidades afectadas por la pobreza y el hambre. Además, contribuye a salvaguardar la salud, reducir la mortalidad infantil y preservar los recursos naturales (PNUD, 2023).

1.1.4 El agua en el Perú

Perú se encuentra en la octava posición a nivel mundial en cuanto al volumen de agua dulce, siendo el tercer país de América Latina después de Brasil y Colombia en este aspecto. A pesar de esta abundancia aparente, la distribución de agua dulce en el país es desigual. La Región Hidrográfica Amazónica concentra el 97% del agua dulce disponible, albergando al 31% de la población, mientras que la Región Hidrográfica del Pacífico, donde se ubica la mayor parte de la población (65%) y las actividades económicas, contribuye solo con el 1,77% del agua dulce total de Perú. Lima ha experimentado un notorio aumento en la demanda de agua debido al significativo crecimiento de la población (+ 51,8%) en los últimos 25 años. En 2018, la población limeña consumió 163 litros de agua per cápita/día, superando ampliamente los 100 litros per cápita/día, recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). A pesar de la escasez de recursos hídricos, más del 70% del Producto Bruto Interno (PBI) agrícola se origina en la Cuenca del Pacífico. La Región Hidrográfica del Titicaca contribuye con el 0,32% del agua dulce total y alberga al 4% de la población.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Estas tres regiones hidrográficas muestran diferencias significativas en cuanto al volumen de agua subterránea, variando desde 542,998 hm³ en la Región Hidrográfica Amazónica (99%) hasta 4,844 hm³ en la Región Hidrográfica del Pacífico (0.9%), con 615 hm³ en la Región Hidrográfica del Titicaca (0,1%). A pesar de que las fuentes de agua subterránea representan el 25% de los recursos hídricos disponibles, la Región Hidrográfica del Pacífico depende significativamente de ellas, utilizándolas principalmente para la agricultura y el consumo humano. Aunque algunos acuíferos, especialmente en la Región Hidrográfica del Pacífico, están cerrados o sobreexplotados, el balance general de aguas subterráneas en el país es positivo, estimándose en más de 546,730 hm3.

En términos de uso del agua en 2018, el 29,3% se destinó a usos consuntivos, principalmente en la agricultura (74,8%), mientras que el 70,7% correspondió a usos no consuntivos, siendo la energía la principal demandante (97,7% de la demanda total no consuntiva), ya que el 81% de la electricidad en Perú proviene de fuentes hidráulicas. Las tensiones relacionadas con el uso del agua están en aumento debido al crecimiento demográfico y económico, y el cambio climático genera mayor escasez de agua y afecta la seguridad hídrica por el deshielo de los glaciares. En los últimos 50 años, el 51% de los glaciares de Perú se ha derretido debido al cambio climático.

En el contexto del cambio climático, los desafíos de gestión del agua enfrentan niveles de incertidumbre sin precedentes. Entre 2000 y 2020, las inundaciones en Perú afectaron a aproximadamente 4,43 millones de personas, dejando a 57,025 sin hogar, causando lesiones a 1,666 personas y cobrándose la vida de 787. En 2017, se registró la inundación de mayor magnitud con 1.8 millones de afectados y daños económicos por USD 3,100 millones en seis departamentos, incluyendo Lima. El Niño Costero de 2017 fue catalogado como uno de los eventos meteorológicos más devastadores del siglo XXI en el país. En la región amazónica, el fenómeno de La Niña es el principal desencadenante de lluvias torrenciales. El aumento de las inundaciones también da lugar a "huaicos", deslizamientos de tierra altamente destructivos en áreas de mayor altitud, responsables del 4% de las emergencias registradas entre 2003 y 2014. Estos huaicos desplazan grandes cantidades de lodo, provocando daños a asentamientos humanos e infraestructuras, así como conflictos y pérdidas de vidas. Además, obstaculizan la adecuada captación de agua en las plantas de tratamiento. Entre 2000 y 2020, los deslizamientos de tierra afectaron a 1,140 personas, de las cuales 307 resultaron fatales. El Fenómeno de El Niño también origina sequías en el sur de Perú. Según

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

un análisis de SENAMHI (2019), que abarca 20 departamentos del país, se produjeron diez eventos de sequía moderada a extrema en Perú entre 1981 y 2018. La gestión del agua en condiciones de incertidumbre demanda reconocer conflictos entre la prestación de servicios y la conservación de los recursos hídricos, considerar compensaciones complejas en el suministro conjunto de bienes públicos y privados de los ecosistemas de recursos hídricos, comprender la importancia crucial del uso del agua para el crecimiento económico equilibrado con la conservación del agua para el progreso sostenido y el desarrollo sostenible, prestar atención a las externalidades generalizadas derivadas de la naturaleza interconectada del ciclo hidrológico, considerar la relevancia de la seguridad hídrica a largo plazo y abordar la creciente incertidumbre sobre los suministros futuros con precaución extrema como actitud política sensata. Además, se debe reconocer el alto costo fijo (de capital) de las infraestructuras hídricas y el desafío pendiente de diseñar esquemas de distribución de beneficios y costos que sean efectivos y eficientes.

1.1.5 Beneficios ambientales y económicos del reciclaje del agua

El agua, siendo el recurso vital esencial para todas las formas de vida en nuestro planeta, ha ganado una importancia creciente en la necesidad de mejorar y conservar su calidad a nivel mundial. El aumento constante de la población mundial ha exacerbado la escasez de agua dulce, afectando de manera significativa las actividades diarias de muchas personas. Dado que las fuentes de agua dulce son limitadas, la gestión, tratamiento y reciclaje del agua se presentan como las únicas alternativas viables para satisfacer la demanda en las próximas décadas, permitiendo que las futuras generaciones disfruten de una vida sostenible con acceso adecuado al vital líquido (Kumar et al., 2021).

La contaminación de los recursos hídricos proviene de diversas fuentes puntuales y difusas, como las actividades industriales, domésticas y agrícolas, así como de cambios ambientales y globales como la erosión y la deforestación. Estos factores hacen que el agua no sea apta para el consumo. En noviembre de 2022, la población mundial superó por primera vez los 8.000 millones de personas, destacando la necesidad urgente de desarrollar tecnologías efectivas, asequibles y rápidas para el tratamiento de aguas residuales y lograr la sostenibilidad global en términos de recursos de agua dulce (Alcalde, 2022).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Se han realizado numerosos esfuerzos para comparar diversas tecnologías de reutilización y tratamiento de aguas residuales, así como para introducir enfoques que permitan una gestión más efectiva del agua. Estas tecnologías varían en eficiencia, producción de residuos sólidos, vida útil y requisitos operativos. Sin embargo, antes de abordar cualquier tecnología de tratamiento y recuperación de agua, es esencial comprender la naturaleza y cantidad de los contaminantes presentes (Stec y Kordana, 2015).

En este contexto, las tecnologías de tratamiento de aguas residuales se utilizan principalmente para tres propósitos: tratamiento de aguas residuales, reutilización del agua y protección de las fuentes de agua. Las aguas residuales recicladas pueden emplearse en diversas aplicaciones, como riego, construcción de humedales, paisajismo y jardinería, así como en actividades industriales como lavado de agregados, curado de concreto, suministro de agua para torres de enfriamiento y lavado de materiales. Estas prácticas asociadas a la reutilización de aguas residuales contribuyen al crecimiento económico y a la protección del medio ambiente de diversas maneras, además de promover una bioeconomía circular sostenible y la conservación de los recursos naturales.

1.1.6 Procesos de reciclaje de agua

El ciclo del agua, también conocido como ciclo hidrológico, representa el movimiento constante del agua en el entorno. Con el crecimiento de la población y el avance de la sociedad, se necesita una gestión planificada del agua para complementar su ciclo natural y satisfacer las crecientes necesidades de agua (Kumar et al., 2021).

a) Reciclaje natural

El proceso de reciclaje más elemental es el propio ciclo del agua. El agua se purifica de manera natural mientras se desplaza a través de diversas etapas en la superficie, por debajo de la tierra y en la atmósfera terrestre. Cuatro procesos principales, como evaporación, condensación, transpiración e infiltración, contribuyen continuamente a la purificación y circulación del agua en la naturaleza.

La evaporación implica la transformación del agua líquida en vapor de agua o estado gaseoso, y ocurre cuando el agua líquida se expone a la atmósfera y las condiciones no están

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

saturadas de humedad. Este proceso generalmente se produce cuando la superficie del agua se calienta por la exposición al sol o a temperaturas más cálidas del aire, dejando atrás los contaminantes a medida que el agua se evapora (Tian et al., 2020).

La condensación, por otro lado, representa el cambio del estado gaseoso al líquido y sucede cuando el aire caliente y saturado entra en contacto con superficies o aire frío, provocando la liberación de agua en forma líquida debido a la disminución de la temperatura. La condensación facilita que el agua purificada regrese a la superficie terrestre, permitiendo la formación de precipitaciones.

La transpiración se refiere a la transferencia del agua desde las raíces de las plantas hasta los poros de sus tallos, hojas y flores, seguida de su evaporación desde estos poros hacia la atmósfera. Este proceso libera una parte significativa del agua que circula a través de la vida vegetal y permite que los contaminantes se queden en los suelos y las plantas, en lugar de ser liberados en la atmósfera (Wanjiru y Xia, 2018).

Finalmente, la infiltración se produce cuando el agua líquida se desplaza desde la superficie hacia capas subterráneas de la Tierra. Tanto la lluvia como las aguas superficiales se dirigen a través de canales y poros en los sedimentos, permitiendo un proceso de purificación natural antes de que el agua se infiltre en las fuentes de agua subterránea.

Estos procesos son esenciales para el ciclo natural del agua y desempeñan un papel fundamental en la reutilización del agua recuperada. Esta reutilización puede ocurrir de manera directa o indirecta cuando los efluentes de aguas residuales tratadas se reintroducen al ciclo del agua, contribuyendo así a la purificación y disponibilidad del agua para diversos usos, incluido el consumo humano (Leong et al., 2017).

Además, existen otros procesos naturales de reciclaje de agua, como los humedales, las riberas de ríos y los acuíferos, donde el suelo y las plantas actúan como filtros naturales que eliminan contaminantes orgánicos, nitrógeno, patógenos y otros contaminantes emergentes. La formación de biopelículas en las superficies de filtración puede potenciar aún más la eliminación biológica de contaminantes orgánicos y nutrientes. Los humedales, tanto naturales como artificiales, son conocidos por su capacidad para mejorar la calidad del agua, y los humedales creados por el ser humano se pueden diseñar no solo para mejorar la

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

eliminación de contaminantes sino también para expandir hábitats de vida silvestre. Del mismo modo, los sistemas de acuíferos del suelo logran un tratamiento natural, ya que el agua recuperada se filtra lentamente a través del suelo, sometiéndola a procesos físicos, químicos y biológicos para la eliminación de contaminantes antes de llegar al acuífero (Das et al., 2014)

b) Reciclaje artificial

Debido al consumo excesivo de agua, la distribución desigual, la contaminación de las fuentes de agua superficial y subterránea, el crecimiento demográfico y los impactos del cambio climático, diversas áreas del mundo están confrontando escasez hídrica. En este contexto, el reciclaje artificial del agua se vuelve crucial para garantizar su disponibilidad (Kumar et al., 2021).

La creación de subciclos hidrológicos que operen de manera simultánea al ciclo natural del agua se presenta como una medida clave para mitigar esta amenaza. Las plantas de tratamiento de aguas residuales desempeñan un papel fundamental en la sociedad moderna, al posibilitar la descontaminación del agua y su reintegración en el ciclo natural o su reutilización en actividades humanas. A nivel global, existen diversos estándares para el tratamiento de aguas residuales, pero se considera deseable, como mínimo, un tratamiento secundario (biológico) para la reutilización y el reciclaje, ya que los métodos de tratamiento preliminar y primario, en su mayoría basados en separación física, no logran una eliminación sustancial de carbono orgánico, nutrientes y patógenos. En algunos casos, puede ser necesario recurrir a un tratamiento terciario o avanzado para ciertas aplicaciones de reutilización del agua, con el fin de salvaguardar el medio ambiente y la salud pública (Liu et al., 2010).

Para la reutilización del agua, es esencial identificar el uso final previsto y seleccionar un nivel de tratamiento que cumpla con los requisitos específicos de la aplicación. No es necesario ni recomendable someter las aguas residuales al tratamiento más avanzado, ya que esto podría aumentar innecesariamente la complejidad técnica y la demanda energética del sistema. Para determinar el nivel adecuado de tratamiento, es necesario comprender a fondo cómo funcionan los procesos de gestión de aguas residuales y los tipos de contaminantes que cada proceso puede eliminar. El tratamiento preliminar está diseñado para eliminar o reducir el tamaño de sólidos gruesos arrastrados, suspendidos o flotantes, como plásticos,

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

rocas y trapos, así como para eliminar grasa y escoria, y materiales inorgánicos pesados como arena, grava y vidrio. Su objetivo principal es proteger las operaciones subsiguientes y prevenir obstrucciones o daños a bombas y otros equipos. Por lo general, implica una combinación de regulación de flujo, tamices finos y gruesos, trituradores, maceradores, trituradoras, ecualización de flujo, cámaras de arena y aireación previa (Zanni et al., 2019).

El tratamiento principal de las aguas residuales se centra en la eliminación de sólidos flotantes y sólidos suspendidos fácilmente sedimentables. Se minimiza el flujo de aguas residuales para permitir que los sólidos en suspensión se depositen en el fondo de tanques de sedimentación, y los raspadores mecánicos eliminan el lodo sedimentado para procesarlo en unidades de tratamiento de lodos. Cualquier material particulado o grasa restante en la superficie se retira mediante desnatado. En algunas circunstancias, se pueden agregar productos químicos para mejorar la sedimentación y la eliminación de sólidos suspendidos.

El tratamiento secundario de las aguas residuales se encarga de eliminar los sólidos orgánicos suspendidos restantes, así como los orgánicos coloidales y disueltos mediante procesos biológicos. Aunque existen diversos procesos biológicos, todos siguen la misma metodología general: grandes cantidades de microorganismos se utilizan en un proceso controlado para consumir la materia orgánica y soluble restante. Tras el tratamiento secundario, y en ausencia de un tratamiento terciario, las aguas residuales se desinfectan utilizando procesos fisicoquímicos, como ozono o luz ultravioleta (Sarkar, 2023, p. 254).

A pesar del tratamiento secundario, las aguas residuales aún contienen varios componentes, principalmente nutrientes, patógenos, metales pesados, materia orgánica no biodegradable y contaminantes emergentes. Si las instalaciones de aguas residuales deben cumplir con regulaciones de descarga más estrictas o con objetivos específicos de reutilización del agua, es posible que sea necesario aplicar un tratamiento terciario. Algunos procesos comunes de tratamiento terciario incluyen la eliminación biológica o química de fósforo, desnitrificación para la eliminación de nitrógeno, precipitación de metales pesados, ultra y nanofiltración, así como otros procesos basados en membranas. La eliminación de fósforo y nitrógeno es la aplicación más frecuente del tratamiento avanzado para prevenir la eutrofización de las aguas superficiales después de la descarga de efluentes de aguas residuales (Radcliffe y Page, 2020).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Entre los procesos de tratamiento terciario más avanzados se incluyen la oxidación para eliminar contaminantes emergentes, compuestos húmicos y sustancias que proporcionan sabor y olor; la ósmosis inversa para eliminar contaminantes disueltos, sales y materia orgánica natural (NOM); la filtración por membrana para eliminar turbidez, virus, bacterias y protozoos; y el intercambio iónico para eliminar compuestos de dureza, nitrato, NOM y bromuro. El tratamiento avanzado produce un efluente de alta calidad, generalmente seguro para el medio ambiente y adecuado para usos agrícolas, recreativos e industriales.

La desinfección emerge como el proceso más crítico para la protección de la salud pública en las aplicaciones de reutilización del agua. Aunque el cloro es un desinfectante ampliamente utilizado debido a su costo bajo y disponibilidad, la formación de subproductos clorados es una preocupación, especialmente en aguas regeneradas con mayor contenido de materia orgánica. Los desinfectantes químicos sin cloro, como ácido peracético, ácido perfórmico, peróxido de hidrógeno, ozono y ferrato, están ganando terreno al ofrecer una alta inactivación de patógenos sin generar subproductos significativos. La desinfección ultravioleta (UV) representa un método de inactivación física que logra inactivar microorganismos mediante la exposición a luz ultravioleta, sin generar subproductos químicos significativos. Gracias a mejoras en el diseño, mantenimiento y eficiencia energética de los reactores UV, este método ahora es competitivo en costos con el hipoclorito de sodio (Pham et al., 2011).

El costo total de la reutilización del agua varía ampliamente debido a condiciones específicas del sitio, tales como el tamaño de la planta, la ubicación geográfica, la calidad del agua de entrada, los usos finales previstos, las regulaciones locales y los gastos asociados con bombeo, almacenamiento y distribución/transmisión del agua recuperada (Kumar et al., 2021).

En resumen, debido al uso excesivo del agua, la distribución inequitativa, la contaminación de las fuentes de agua superficiales y subterráneas, el aumento de la población y el cambio climático, muchas regiones del mundo se enfrentan a la escasez de agua. En consecuencia, el reciclaje artificial del agua se vuelve esencial para asegurar su disponibilidad (Kumar et al., 2021).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

La implementación de subciclos hidrológicos que funcionen simultáneamente con el ciclo natural del agua contribuirá a mitigar este desafío. Las plantas de tratamiento de aguas residuales desempeñan un papel esencial en la sociedad contemporánea al purificarlas y reintegrarlas al ciclo natural del agua o reutilizarlas para actividades humanas. A nivel global, existen diversos estándares para el tratamiento de aguas residuales; sin embargo, se busca, como mínimo, un tratamiento secundario (biológico) para su reutilización y reciclaje. Esto se debe a que los procesos de tratamiento preliminar y primario se enfocan principalmente en métodos de separación física y no logran una eliminación significativa de carbono orgánico, nutrientes y patógenos. En algunos casos, puede ser necesario aplicar un tratamiento terciario o avanzado para ciertas aplicaciones de reutilización del agua, con el fin de salvaguardar el medio ambiente y la salud pública (Liu et al., 2010).

Cuando se contempla la reutilización del agua, es crucial identificar inicialmente su uso final y seleccionar el nivel de tratamiento que cumpla con las necesidades y requisitos de la reutilización prevista. No es recomendable ni necesario someter las aguas residuales al nivel de tratamiento más elevado, ya que esto aumentaría innecesariamente la complejidad técnica del sistema y la demanda energética. Por lo tanto, para determinar el nivel apropiado de tratamiento del agua, se requiere un sólido conocimiento de cómo funcionan estos procesos de gestión de aguas residuales y los tipos de contaminantes que cada uno de ellos puede eliminar (Zanni et al., 2019).

El tratamiento preliminar de las aguas residuales se concibió con el propósito de eliminar o reducir la presencia de sólidos gruesos arrastrados, suspendidos o flotantes, como plásticos, rocas y trapos, así como para eliminar grasa, escoria y materiales inorgánicos pesados como arena, grava y vidrio. Su objetivo principal es resguardar las operaciones subsiguientes y prevenir obstrucciones o daños a las bombas y otros equipos. Generalmente, el tratamiento preliminar implica una combinación de regulación de flujo, tamizado fino y grueso, trituración, ecualización de flujo, cámaras de arena y aireación previa (Zanni et al., 2019).

El tratamiento primario de las aguas residuales se enfoca en eliminar los sólidos flotantes y los sólidos suspendidos que sedimentan fácilmente. Se minimiza el flujo de aguas residuales para permitir que los sólidos en suspensión se asienten en el fondo de los tanques de sedimentación, y se utilizan raspadores mecánicos para retirar el lodo sedimentado y

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

procesarlo en unidades de tratamiento de lodos. Cualquier material particulado o grasa que quede flotando en la superficie se elimina del depósito de sedimentación. En ciertas circunstancias, se pueden emplear productos químicos para mejorar la sedimentación y la eliminación de sólidos suspendidos (Zanni et al., 2019).

El tratamiento secundario de las aguas residuales se centra en eliminar los sólidos orgánicos suspendidos restantes, así como los orgánicos coloidales y disueltos mediante procesos biológicos. Existen diversos tipos de procesos biológicos, como el tratamiento aeróbico versus anaeróbico y el crecimiento adherido versus suspendido. Sin embargo, todos se basan en la misma metodología, que implica la utilización de microorganismos en grandes cantidades en un proceso controlado para consumir la materia orgánica y soluble que queda. Después del tratamiento secundario, si no se requiere tratamiento terciario, las aguas residuales se desinfectan mediante procesos fisicoquímicos, como el ozono o la luz ultravioleta (Sarkar, 2023).

A pesar del tratamiento secundario, aún quedan diversos componentes en las aguas residuales, principalmente nutrientes, así como patógenos, metales pesados, materia orgánica no biodegradable y contaminantes emergentes. Si se deben cumplir regulaciones de descarga más estrictas o se tienen objetivos de reutilización del agua, es posible que sea necesario implementar tratamiento terciario. Entre los procesos de tratamiento terciario más comunes se encuentran la eliminación biológica o química de fósforo, la desnitrificación para la eliminación de nitrógeno, la precipitación de metales pesados, la ultra y nanofiltración, así como otros procesos basados en membranas. La eliminación de fósforo y nitrógeno es especialmente relevante para prevenir la eutrofización de las aguas superficiales tras la descarga de efluentes de aguas residuales (Radcliffe y Page, 2020).

Algunos de los métodos de tratamiento terciario más avanzados abarcan la oxidación para eliminar contaminantes emergentes, compuestos húmicos y compuestos que afectan el sabor y el olor, la ósmosis inversa para eliminar contaminantes disueltos, sales y materia orgánica natural, la filtración por membrana para eliminar turbidez, virus, bacterias y protozoos, así como el intercambio iónico para eliminar compuestos de dureza, nitrato, materia orgánica natural y bromuro. El tratamiento avanzado produce un efluente de alta calidad que generalmente es seguro para el medio ambiente y para su uso en la agricultura, actividades recreativas e industriales.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

La desinfección es un proceso crucial para proteger la salud pública durante las aplicaciones de reutilización del agua. La desinfección logra una alta reducción de bacterias, virus, protozoos y helmintos, aunque no garantiza la eliminación total. El cloro es un desinfectante ampliamente empleado en todo el mundo debido a su bajo costo y disponibilidad, aunque la formación de subproductos de desinfección con cloro es una preocupación particular en el agua regenerada debido a su mayor contenido de materia orgánica. Los desinfectantes químicos alternativos sin cloro, como el ácido peracético, el ácido perfórmico, el peróxido de hidrógeno, el ozono y el ferrato, están encontrando lentamente su lugar en el mercado y ofrecen una alta inactivación de patógenos sin una formación significativa de subproductos de desinfección. La desinfección ultravioleta (UV) es un proceso de inactivación física y logra la inactivación de microorganismos con luz ultravioleta a través del daño a su material nucleico. Dado que no es un método de desinfección química, no da lugar a la formación de subproductos, y debido a las mejoras en el diseño, el mantenimiento y la eficiencia energética del reactor, ahora es competitivo en costos con el hipoclorito de sodio.

El costo total de la reutilización del agua varía ampliamente debido a las condiciones específicas del sitio, que incluyen el tamaño de la planta, la ubicación, la calidad del agua entrante, las expectativas de uso final, las regulaciones locales y los costos de bombeo, almacenamiento y distribución/transmisión del agua recuperada (Kumar et al., 2021).

1.1.7 Caracterización de las aguas grises y aguas negras

a) Aguas grises (greywater)

Se define como aguas grises al agua usada sin tratar que no ha estado en contacto con los desechos del inodoro. Esta proviene de duchas, lavados, bañeras, lavados del baño y agua de tinas de lavado y lavandería. No incluye agua utilizada en urinarios, inodoros, fregaderos de cocina o lavavajillas. (OEFA, 2014).

Se excluye el agua usada vertida desde fregaderos de cocina y lavavajillas debido a la presencia de grasa y aceite, así como a su alto contenido orgánico que podría agotar el oxígeno y aumentar la actividad microbiana en las aguas grises, incrementando así los riesgos microbianos debido al clima.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

b) Aguas negras (blackwater)

Este tipo de agua residual se genera a partir de los inodoros y urinarios, conteniendo desechos como heces y orina. Es imperativo que todas las aguas negras sean dirigidas directamente al sistema de alcantarillado. El reciclaje de aguas grises tratadas conlleva diversos beneficios, entre ellos la reducción de la demanda de agua potable, el volumen de agua descargada al sistema de alcantarillado y los costos asociados al consumo de agua.

c) Fuentes y cantidades

Variabilidad en las fuentes y cantidades de aguas grises:

Las aguas grises presentan una amplia variación en términos de fuentes y cantidades, dependiendo de la naturaleza y usos en edificaciones comerciales, industriales, y otros espacios no residenciales, así como de las costumbres de uso en hogares o complejos residenciales. Factores como el número de ocupantes, la distribución de edad de la población, los estilos de vida y los patrones de uso del agua influyen significativamente en la cantidad de aguas grises generadas por cualquier edificio. (OEFA, 2014).

Agua gris del baño:

Aproximadamente el 40% del volumen total de agua utilizable corresponde a aguas grises del baño (bañera, lavabo y ducha). La calidad de estas aguas grises está sujeta al comportamiento de las personas que utilizan los servicios y puede contaminarse con diversos elementos como cabello, jabones, champús, tintes de cabello, reacondicionadores, pasta de dientes, pelusa, nutrientes capilares y corporales, grasas corporales, aceites, y productos de limpieza. Además, puede contener materia fecal, con los patógenos asociados al lavado corporal de zonas íntimas.

Agua gris de lavandería:

Aproximadamente el 20% del volumen total de aguas grises utilizables proviene de la lavandería. La calidad de estas aguas varía desde el agua de lavado hasta el agua de enjuague y el segundo enjuague. Pueden contener materia fecal con los patógenos asociados, pelusa, aceites, grasas, productos químicos, jabones, nutrientes y otros compuestos derivados de la ropa sucia o productos de limpieza.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Estimación de la generación de aguas grises:

Se estima que un edificio comercial con 1000 empleados genera aproximadamente entre 20,000 y 25,000 litros de aguas grises por día.

d) Características

La calidad de las aguas grises puede variar considerablemente debido a factores como la cantidad de personal en edificios comerciales/oficinas, la edad, el estilo de vida, la salud y los productos utilizados (como jabones, champús, productos de limpieza), entre otros.

Las aguas grises se contaminan de tres maneras debido a la adición de sustancias de desecho:

- Contaminación biológica por microorganismos, muchos de los cuales pueden ser patógenos, causantes de enfermedades.
- Contaminación química por sales disueltas como sodio, nitrógeno, fosfatos y cloruros, o por productos químicos orgánicos como aceites, grasas, leche, jabón y detergentes, que pueden servir de alimento para el crecimiento de microorganismos y plantas.
- Contaminación física por partículas de suciedad, comida, pelusa, arena, etc.

e) Riesgos ambientales

Riesgos para la salud humana:

El principal riesgo derivado del contacto humano con aguas grises es la posible infección y enfermedad causadas por virus, bacterias y otros patógenos. La exposición prolongada a los productos químicos presentes en las aguas grises también puede tener efectos adversos para la salud. (OEFA, 2014).

Medidas para mitigar impactos negativos:

Para minimizar los impactos adversos en el medio ambiente relacionados con el reciclaje de aguas grises, se establecerán ciertos requisitos, incluyendo:

- La necesidad de un tratamiento y desinfección adecuados de las aguas grises antes de su reutilización en descargas de inodoros, lavado general, riego y/o torres de enfriamiento.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- La prohibición del vertido de desechos químicos como pinturas, aceites automotrices, grasas, pesticidas y residuos farmacéuticos en el sistema de reciclaje de aguas grises.
- La prohibición de que las aguas grises fluyan hacia propiedades vecinas, caminos de entrada, estacionamientos u otras superficies duras que puedan llevarlas a calles y desagües de aguas pluviales, debiendo ser dirigidas hacia el alcantarillado público o recicladas para otros usos.

f) Consideraciones de salud pública

Transmisión de enfermedades:

Las aguas grises pueden transmitir enfermedades mediante el contacto directo con manos contaminadas, inhalación de agua gris rociada o contacto con la piel lesionada, así como a través de contacto indirecto con artículos contaminados, como juguetes, equipos de jardinería, césped o tierra. (OEFA, 2014).

Protección de la salud pública:

La protección de la salud pública es fundamental, y se enfatiza la importancia de establecer "barreras" entre las aguas grises y el público. Combinar un proceso de tratamiento terciario con una desinfección confiable, así como mantener tuberías en buen estado, controles de aplicación y restricciones, contribuirá a reducir los riesgos para la salud pública mediante la mejora de la calidad de las aguas grises tratadas y la disminución de la exposición a las mismas.

Requisitos para la gestión segura de aguas grises:

- Las aguas grises tratadas se utilizarán exclusivamente para fines no potables, como descarga de inodoros, lavado general, irrigación y/o reposición de torres de enfriamiento.
- Deben cumplirse requisitos mínimos de calidad para el uso de aguas grises tratadas.
- Se prohíben interconexiones o conexiones cruzadas entre tuberías o accesorios que transporten agua potable y aquellos que transporten agua no potable.
- Equipos y sistemas relacionados con aguas grises deben ser debidamente etiquetados.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- Las aguas grises tratadas no deben contener agentes perjudiciales que puedan causar enfermedades infecciosas o poner en peligro la salud pública por exposición humana directa o indirecta.
- Los tanques de aguas grises deben ser a prueba de mosquitos.
- La calidad de las aguas grises tratadas no debe tener impactos adversos en el medio ambiente ni en la salud pública, considerando equipos, dispositivos, tuberías, accesorios y materiales en contacto con las mismas.
- La operación y mantenimiento del sistema de reciclaje de aguas grises no deben causar molestias a la salud pública, como ruido excesivo, olores desagradables, o la proliferación de mosquitos, entre otros.
- Si las aguas grises tratadas se emplean en torres de enfriamiento como agua de reposición, deben ajustarse a las regulaciones establecidas para este propósito. (OEFA, 2014).

g) Usos de aguas grises tratadas

Aplicaciones autorizadas:

Las aguas grises tratadas pueden emplearse en diversas actividades, como la descarga de inodoros, lavado general, riego y/o refrigeración de torres de enfriamiento. Sin embargo, se prohíbe expresamente el uso de aguas grises tratadas para el lavado general en mercados y establecimientos de comida.

Restricciones en usos minoristas:

El uso de aguas grises tratadas en aplicaciones minoristas, incluyendo el lavado a alta presión y aspersores de riego, queda prohibido debido a posibles problemas de salud pública (Stevenc, 2014).

h) Aguas residuales en el Perú

Las aguas residuales en el Perú se definen como aquellas cuyas características originales han sido alteradas por actividades humanas, requiriendo un tratamiento previo antes de su reutilización, vertido en cuerpos de agua naturales o descarga en sistemas de alcantarillado. (OEFA, 2014).

Las aguas residuales se clasifican como:

- Aguas residuales domésticas. Provenientes de residencias y comercios, contienen desechos fisiológicos y otros, exigiendo una disposición adecuada.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- Aguas residuales industriales. Producidas en procesos productivos, incluyendo sectores como minería, agricultura, energía y agroindustria.
- Aguas residuales municipales. Aguas residuales domésticas que pueden mezclarse con drenaje pluvial o aguas industriales tratadas previamente, para su incorporación en sistemas de alcantarillado combinados.

Los desafíos principales asociados a las aguas residuales en el Perú se enumeran como:

- Cobertura insuficiente de EPS Saneamiento. Solo el 69,65% de la población urbana está cubierta por las 50 EPS Saneamiento que ofrecen alcantarillado. La población no cubierta vierte sus aguas residuales sin tratar al mar, ríos, lagos o las utiliza para riego, generando problemas ambientales.
- Problemas de infraestructura de EPS Saneamiento. Las plantas de tratamiento enfrentan sobrecargas, resultando en efluentes tratados que superan límites máximos permisibles (LMP) y no cumplen con estándares de calidad ambiental (ECA). Esto ocasiona contaminación, malos olores y conflictos con la población.

1.1.8 Contaminación de cuerpos de agua naturales en el Perú

En el Perú, según la OEFA (2014), se generan alrededor de 2`217,946 m^3 diarios de aguas residuales descargadas en la red de alcantarillado de las EPS Saneamiento, de las cuales solo el 32% recibe tratamiento, Figura 1.2. Cada habitante produce 142 litros de aguas residuales al día. Lima, por su parte, contribuye con aproximadamente 1,202,286 m^3 diarios al sistema de alcantarillado, con solo el 20,5% de estas aguas tratadas. En promedio, cada habitante limeño genera 145 litros de aguas residuales diariamente.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 1.2 Aguas residuales descargadas a la red de alcantarillado en Lima

Fuente: OEFA

La producción de aguas residuales varía levemente entre las regiones geográficas, siendo la costa y la sierra ligeramente diferentes, mientras que la selva es la que genera la menor cantidad de efluentes, como se observa de la Figura 1.3

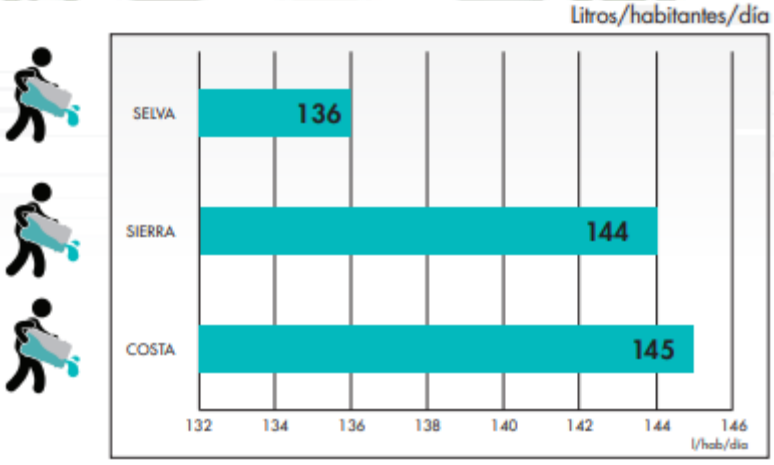


Figura 1.3 Agua residual generada a diario por persona en cada región del Perú

Fuente: OEFA

En el año 2024, el Perú generará más del doble de aguas residuales que actualmente manejan las EPS, con respecto a lo generado en el año 2012, Figura 1.4.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

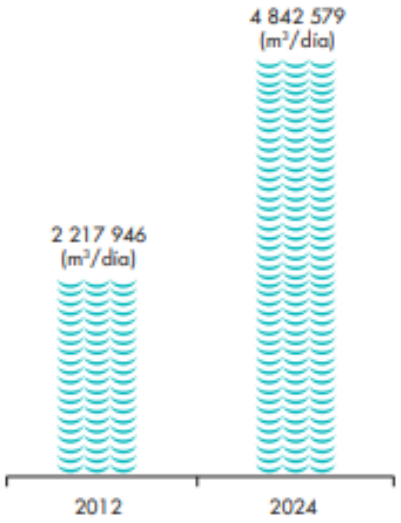


Figura 1.4 Aguas residuales que procesan Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento

Fuente: OEFA

1.2 Estimación del uso de agua en una vivienda por minuto

Los cálculos estimados se basan en mediciones del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (2010), indicando que cada persona:

- Al ducharse durante un minuto con el grifo abierto, consume aproximadamente 12 litros de agua.
- En el lavatorio, al realizar actividades como lavarse los dientes, manos o afeitarse durante un minuto con el grifo abierto, se consumen alrededor de 6 litros de agua.
- En la pila de la cocina, al lavar platos, fregar o lavar alimentos durante un minuto con el grifo abierto, se consumen aproximadamente 8 litros de agua.
- Al lavar el vehículo o regar plantas durante un minuto con el grifo abierto, se utiliza cerca de 10 litros de agua.
- En el servicio sanitario, cada descarga consume en promedio 10 litros de agua.

1.2.1 Estimación del consumo de agua por persona

La estimación del consumo diario de agua por persona es de aproximadamente 180 litros, distribuidos de la siguiente manera:

- En la ducha, 6 minutos con el grifo abierto: 72 litros.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- En el lavatorio, 5 minutos con el grifo abierto: 24 litros.
- En el servicio sanitario, 3 descargas al día: 30 litros.

Consideración colectiva:

- Lavado de platos y preparación de alimentos: 40 litros.
- Lavado de ropa: 8 litros.
- Otros usos como lavado de auto, riego, limpieza: 6 litros.

Promedio total: 180 litros.

1.2.2 Estimación del consumo de agua en una familia promedio de 5 miembros

El estimado del consumo de agua de una familia de 5 miembros es de aproximadamente 27.7 m^3, distribuidos de la siguiente manera:

- Gasto de agua en la ducha: 65 litros por baño, totalizando 9.8 m3 al mes (35.4% del consumo total mensual).
- Uso del servicio sanitario: 4.2 m3 al mes (15% del consumo total mensual).
- Lavado de ropa: 1.7 m3 al mes (6.1% del consumo total mensual).
- Utilización del lavatorio: 3.5 m3 al mes (12.6% del consumo total mensual).
- Preparación de alimentos: 7.0 m3 al mes (25.3% del consumo total mensual).
- Otros usos: 1.5 m3 al mes (5.4% del consumo total mensual).

Consumo total de agua al mes: aproximadamente 27.7 m^3.

1.3 Plan de ahorro de agua para una familia de 5 miembros

Un plan de ahorro de agua para una familia de 5 miembros incluye los siguientes alcances, según el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (2010):

- Reducir un minuto en el tiempo de duchado de 6 a 5 minutos generará un ahorro de volumen equivalente a 11 litros por baño por persona, resultando en un ahorro mensual de 1.7 m^3.
- Utilización del servicio sanitario. El consumo permanece constante, ya que el tanque del inodoro es inmutable, lo que implica que no hay oportunidad de ahorro en esta categoría.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- Lavado de ropa. Reducir en 10 litros por tanda de lavado resultaría en una disminución del consumo de 0.3 m^3 cada mes.
- Uso del lavatorio. Reducir el tiempo de 4 a 3 minutos por lavado de dientes generaría un ahorro de 0.9 m3 al mes.
- Preparación de alimentos. Reducir el tiempo de la llave abierta en el lavado de utensilios de 40 a 35 minutos al día se traduciría en una reducción de 1.0 m^3 al mes.
- Otros. Establecer como meta reducir en 5 litros diarios las actividades de higiene doméstica, lavado de pisos, lavado de automóviles, riego de algunas plantas caseras, entre otras, conllevaría a un ahorro de 0.15 m^3 al mes.

AHORRO DE AGUA MENSUAL: aproximadamente 4 m^3/mes

250,000 servicios con ahorro de 4 m^3/mes = 1,000,000 m^3, lo que equivale a abastecer a 37,000 familias adicionales (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, 2010)

1.4 Tecnologías y experiencias en reutilización de aguas grises

El proceso de lavado en lavadoras domésticas de carga superior se basa en el transporte de masa e impulso desde un agitador a la corriente de fluido, liberando la ropa de grasas, polvo, olores y compuestos no deseados. Este proceso vierte el 100% del agua utilizada al sistema de alcantarillado, sin mayor tratamiento. El 30% del primer ciclo de lavado puede reutilizarse, y el 70% restante de los ciclos de enjuague puede utilizarse para otros fines domésticos.

1.4.1 Uso de recursos hídricos alternativos

En entornos urbanos, tanto el agua de lluvia como las aguas grises pueden ser considerados recursos hídricos alternativos recolectados, tratados y distribuidos a través de sistemas descentralizados. Las aguas grises provienen de fregaderos, duchas o baños, excluyendo las aguas negras de inodoros, mientras que el agua de lluvia se define como la

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

precipitación recolectada de tejados. La implementación separada de sistemas de agua de lluvia o aguas grises aumenta los costos de capital.

1.4.2 Procesamiento de aguas grises vinculado basado en el estilo arquitectónico

El sistema de procesamiento de aguas grises, Juan (2016), está vinculado a un sistema de reutilización basado en el estilo arquitectónico y comportamiento del consumo de agua. Este sistema integra un dispositivo de almacenamiento de agua, filtrado, motor y tuberías de drenaje, permitiendo una configuración flexible según los planos de planta y características espaciales residenciales, ver Figura 1.5.

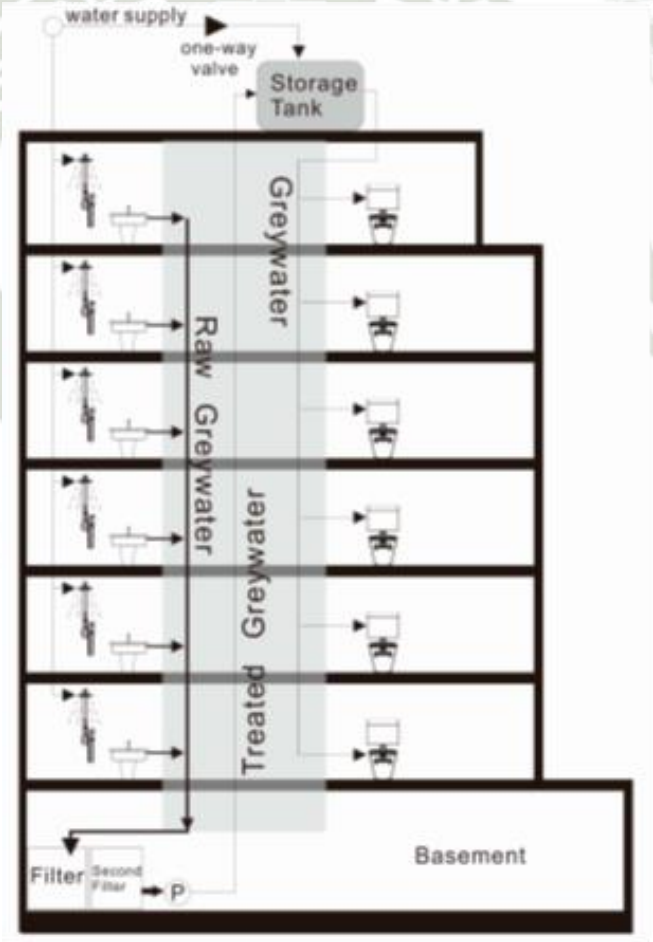


Figura 1.5 Sistema convencional de tratamiento de aguas grises

Fuente: Yi-Kai Juan, Yi Chen y Jing-Ming Lin

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

1.4.3 Optimización de la Sustitución Parcial de Agua Potable

La planificación urbana centrada en el agua busca maximizar la sustitución de agua potable por agua no potable. Los sistemas duales de suministro de agua son fundamentales y se han implementado en varias ciudades del mundo desarrollado. Los sistemas de doble red buscan un mayor reemplazo del agua del grifo con agua reciclada en los hogares para mejorar la eficiencia del sistema y garantizar la sostenibilidad en el suministro de agua. A pesar de ello, los usos finales actuales de estos sistemas son limitados.

En la actualidad, el riego de jardines, el lavado de inodoros/urinarios y el lavado de automóviles son los usos más comunes del agua reciclada proveniente de sistemas de doble red. El Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas, en 1958, estableció que "no se debe utilizar agua de mayor calidad para un propósito que pueda tolerar un grado inferior". No obstante, en varios países, incluyendo Australia, se utiliza agua potable para actividades de lavandería. La viabilidad del uso de agua reciclada en lavanderías aún no ha sido suficientemente investigada. La eficiencia del agua en lavadoras ha sido objeto de numerosas regulaciones y mejoras significativas. La transición de lavadoras de carga superior a opciones de carga frontal, más eficientes en agua, es un enfoque implementado para alcanzar este objetivo. El uso de agua reciclada en lavadoras se percibe como una opción más sostenible para este nuevo uso final del agua reciclada (Mainali et al., 2011).

Las aguas residuales de los inodoros, que incluyen orina y agua marrón (heces + agua de la cadena), tienen un volumen de 10,000 a 25,000 L/persona/año, dependiendo del tipo de inodoro. Las aguas grises (agua de higiene personal, cocina y lavandería, excluyendo inodoros), varían entre 25,000 y 100,000 L/persona/año según el estado de los dispositivos de ahorro de agua en los hogares.

Las aguas residuales de lavanderías domésticas, industriales y hospitalarias son fuentes de aguas grises que podrían ser refinadas, recicladas y reutilizadas. En las lavanderías industriales, se utilizan aproximadamente 15 L de agua para lavar 1 kg de ropa, generando un promedio de 400 m3 de aguas residuales al día (Manouchehri, M., y Kargari, A., 2017).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

1.4.4 Desafíos en la Reutilización de Aguas Grises

Se ha reconocido que el reciclaje de aguas residuales urbanas es una fuente importante y un aspecto clave de la política hídrica sostenible. No obstante, la reutilización de aguas residuales es un tema sensible que involucra a la comunidad en general. Se ha observado que varios proyectos no han tenido éxito debido a la oposición de la comunidad. Creencias preconcebidas, actitudes, aprehensiones, falta de información y desconfianza generalizada son razones comunes por las que la comunidad se opone a los esquemas de reutilización. Estos factores suelen justificarse por el frecuente mal funcionamiento de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales en todo el mundo (Mainali et al., 2011).

1.4.5 Análisis de Investigaciones Previas

Al examinar la literatura relacionada con el tema propuesto, se han identificado trabajos que guardan pertinencia con la investigación actual. En primer lugar, el estudio de Ortega (2016), titulado "Sistema alternativo para reutilizar aguas grises en una vivienda de la ciudad de Machala", destaca los siguientes puntos: La implementación de sistemas de reutilización de aguas grises permite un ahorro del 27% de agua potable, contribuyendo al abastecimiento en áreas donde la red pública de agua potable es insuficiente. Estos sistemas deben ser considerados en construcciones no ejecutadas, ya que requieren el diseño de una nueva red para la recolección, almacenamiento y distribución de aguas grises. En edificaciones ya existentes, su implementación es más compleja y costosa. La diferencia entre un sistema de reutilización y las instalaciones antiguas radica en la capacidad de instalar una doble canalización para aguas grises. Se enfatiza la necesidad de evaluar la instalación como cualquier otro componente de fontanería. Se destaca la importancia de establecer ordenanzas en urbanizaciones para promover la adopción de sistemas de reutilización de aguas grises por parte de las autoridades competentes.

Por otro lado, la investigación de Llanos (2012), titulada "Propuesta de Instalación Hidráulica Sanitaria para la reutilización de Aguas Grises y Aprovechamiento de Aguas Pluviales en Unidades Habitacionales Ubicadas en la Ciudad de México", presenta los siguientes aspectos destacados: La propuesta de instalación hidráulica sanitaria se basa en determinar el volumen diario de aguas grises generado, identificar actividades viables para utilizar agua gris tratada y proponer un sistema que separe las aguas grises de las aguas negras.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Se sugiere un sistema de tratamiento con equipos disponibles en el mercado, acompañado de un análisis de costos que abarca instalación, operación y mantenimiento, así como un análisis de costo-beneficio para evaluar la factibilidad económica.

En el trabajo de Florez y Granados (2010) sobre "Elaboración de un Sistema para la Reutilización del Agua Residual de la Lavadora, Adaptable al Proceso Constructivo de una Batería de Lavado", se enfocan en un sistema específico: El sistema diseñado para reutilizar el agua residual de la lavadora puede adaptarse a un muro estándar frente a la misma. Puede almacenar 130 litros de agua, lo que representa una carga completa para lavadoras con diferentes capacidades. Aunque no incluye un sistema de tratamiento de aguas grises, se recomienda para investigaciones futuras analizar la calidad del agua residual en los diferentes ciclos de lavado y diseñar un sistema de tratamiento adecuado.

En el estudio de Ruiz (2019) sobre "Sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises aplicables a sectores urbanos con déficit hídrico", se destacan los siguientes puntos:

Las aguas grises representan entre el 60-70% del total de agua consumida diariamente en los hogares, siendo menos contaminadas que las aguas negras, lo que facilita su reutilización para abastecer inodoros, lavado de autos y riego. Se menciona la necesidad de un tratamiento biológico para disminuir y degradar la materia orgánica presente en las aguas grises, especialmente para el riego de plantas. Se subraya la importancia de que las entidades gubernamentales impulsen medidas para fomentar la reutilización de aguas grises, reconociendo la necesidad de disponibilidad hídrica y destacando la relevancia de este recurso.

En resumen, estas investigaciones anteriores ofrecen valiosas perspectivas sobre la implementación de sistemas de reutilización de aguas grises en diversas circunstancias, desde viviendas individuales hasta unidades habitacionales y sectores urbanos con déficit hídrico. Estos estudios abordan aspectos técnicos, económicos y ambientales, proporcionando conocimientos cruciales para el desarrollo y la promoción de tecnologías sostenibles de gestión del agua.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos

En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Capítulo 2

2. METODOLOGÍA

Una parte significativa de los productos y servicios más innovadores desarrollados recientemente están estrechamente vinculados a investigaciones científicas. A menudo, se tiende a ver estos productos y servicios como simples aplicaciones prácticas del conocimiento científico, olvidando que la mayoría de los nuevos descubrimientos científicos han requerido avances tecnológicos significativos en términos de equipos y procesos sofisticados para llevar a cabo con éxito experimentos y trabajos de investigación.

No es apropiado dilucidar cuál de las dos, ciencias o tecnologías, es más importante, ya que ambas se complementan y son mutuamente necesarias. Hoy en día, resulta impensable concebir unas sin las otras.

Un método es una manera específica y ordenada de proceder con el objetivo de alcanzar un resultado determinado. Sus características principales son: a) sigue un procedimiento racional; b) es un procedimiento general, aplicable a cualquier caso particular; y c) es observable y reproducible por cualquier persona (Riba, 2002).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.1 Proceso de diseño y desarrollo

El ciclo básico de diseño es una unidad fundamental que se aplica de forma iterativa a lo largo de todo el proceso de diseño en una secuencia en forma de espiral convergente donde cada vez las soluciones obtenidas se aproximan más a los objetivos y requerimientos del enunciado del problema. Sin embargo, debido a su carácter general y abstracto, no ofrece el suficiente alcance para establecer una metodología de diseño, por lo que conviene estructurar el proceso de diseño en grupos de actividades relacionadas que conduzcan a ciertos estadios de desarrollo.

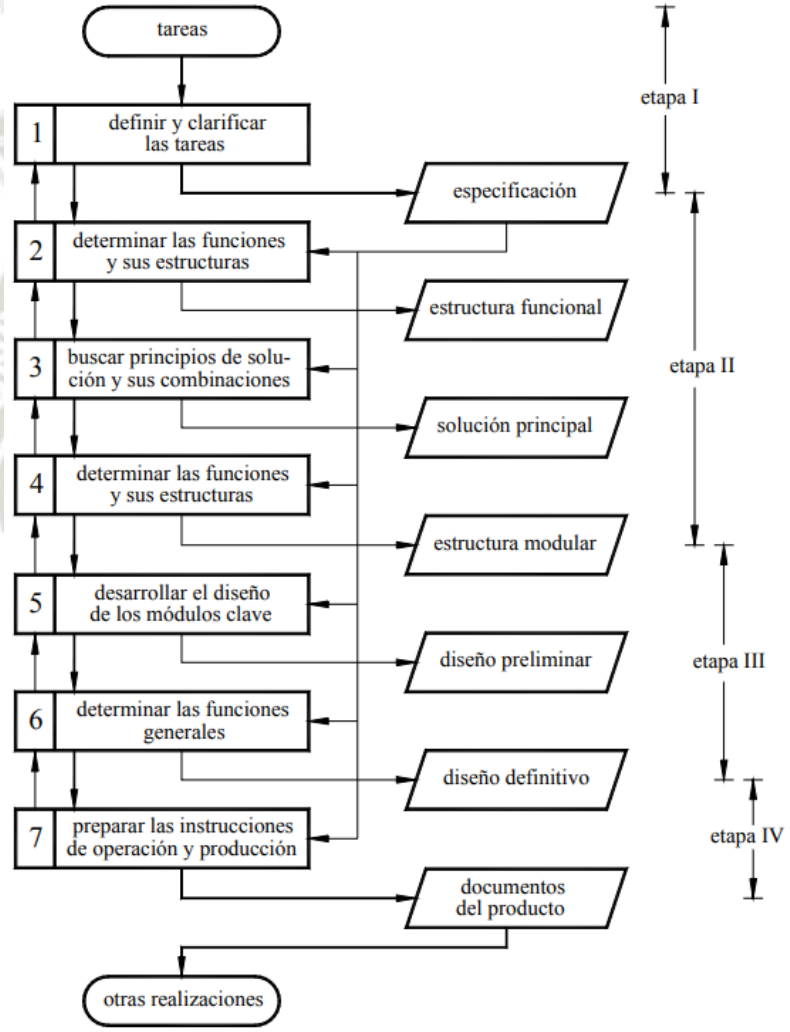


Figura 2.1 Etapas del proceso de diseño según la norma alemana VDI 2221

Fuente: Carles Riba y Romeva Diseño Concurrente 2002

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

El modelo de etapas del proceso de diseño se basa en la idea que el diseño puede expresarse en cuatro niveles de definición que determinan los resultados de cada una de les etapas sucesivas:

- **Etapa 1**: Definición del producto. Resultados: Especificación
- **Etapa 2**: Diseño conceptual. Resultados: Principios de solución, estructura funcional, estructura modular
- **Etapa 3**: Diseño de materialización. Resultados: Planos de conjunto
- **Etapa 4**: Diseño de detalle. Resultados: Planos de pieza, documentos de fabricación

La Figura 2.1 reproduce el esquema de etapas del proceso de diseño dado por la norma alemana VDI 2221.

2.2 Estudio Documental

2.2.1 Diseño de la etapa de documentación:

Se realizó una indagación sistemática en fuentes primarias, entre ellas, libros, tesis, bases de datos, journals, artículos científicos, artículos de revisión, magazines y normas técnicas y sitios web orientados al abordaje de la temática de la reutilización de aguas grises provenientes de máquinas de lavado y medidas de ecoeficiencia para mitigar los efectos del estrés hídrico.

2.2.2 Estrategias de búsqueda de la información

Identificado el problema y delimitado el alcance del estudio, se procedió a la búsqueda de antecedentes investigativos en español, a nivel local, nacional e internacional a través de las ecuaciones de búsqueda “reutilización de aguas grises provenientes de máquinas de lavado” y “reciclaje de agua de lavadoras”, en repositorios documentales como ALICIA del CONCYTEC, Google Scholar, Cibertesis y el portal Tesis en Red, que abarca la producción del ámbito iberoamericano.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

De otra parte, para la fundamentación del marco teórico se hizo la búsqueda en las bases de datos: Elsevier Scopus, EBSCOhost, Science Direct, Web of Science y la base de datos de libros Springer Link, a través de las ecuaciones de búsqueda en inglés, "water recycling" AND "washing machine", así también, recycled water AND household laundry AND washing machine, además “reuse detergent in washing machine”.

2.2.3 Planteamiento de los criterios de inclusión y exclusión

La evaluación de la literatura partió de la lectura de los abstract, de cuya pertinencia se hizo la descarga del texto completo, privilegiando la inclusión de artículos de investigación por sobre las revisiones, la fecha de publicación y la coincidencia con los criterios de búsqueda, sin embargo, no se limitó únicamente a los artículos de acceso abierto, sino que también, se logró recuperar artículos de pago, incluyendo los libros, de cuyas versiones previas en línea se hizo la captura, reconocimiento óptico de caracteres empleando la herramienta software Snagit © y la correspondiente traducción. Con lo que la valoración de recursos documentales fue amplia y exhaustiva.

2.2.4 Extracción de datos

Dado que la mayoría de las fuentes que se incluyeron en el marco teórico, estuvieron escritas en idioma inglés, se tradujeron una a una, a la par se incorporaron al gestor de referencias y conocimiento CITAVI ©, en cuyas funcionalidades se hizo el inventario de fuentes y se procesó las citas, principalmente, las correspondientes a las citas indirectas, resúmenes y comentarios. Las referencias se procesaron en estilo APA 7ma. Edición.

2.2.5 Análisis de la información

Luego de la lectura del texto completo de las fuentes consultadas se procesaron las citaciones y referencias, incorporándolas en la estructura del presente documento, teniendo que la mayor parte de soluciones al tema de la reutilización del agua tenían que ver fundamentalmente con estudios de la calidad de las aguas residuales, métodos de tratamiento de las aguas grises, incorporación de sistemas de reciclaje de agua en nuevas edificaciones,

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

más que el uso del agua gris de lavadoras en nuevos ciclos de lavado, de esto último no se encontró información por no ser una práctica suficientemente estudiada para ser recomendada.

2.3 Diseño del prototipo funcional de sistema hidráulico para la reutilización de aguas grises

2.3.1 Especificaciones de acuerdo a VDI 2221

Lista de requerimientos			
Item	Proyecto	"Diseño e implementación de un sistema de reutilización de aguas grises efluentes de lavadoras."	Elaborado: ABM
	Deseo o exigencia	Descripción	Responsable
1	E	Función principal: Realizar el reciclaje de aguas grises provenientes de lavado en máquina. Secuencia semiautomática controlada por tablero.	ABM
2	E	Materia: Detergente y agua	ABM
3	E	Geometría: Altura entre 3,5 a 4,0 m	ABM
4	E	Energía: Potencia eléctrica necesaria para el funcionamiento del tablero de control, electroválvulas, sensores de boya y motores.	ABM
5	E	Seguridad: Atendiendo a la norma NTP 235	ABM
6	E	Costo: Estimar la rentabilidad económica	ABM
7	E	Fabricación: Construir considerando la economía	ABM
8	E	Montaje: Facilidad y rapidez en el montaje y desmontaje.	ABM
9	E	Mantenimiento: Facilidad de acceso para labores de mantenimiento	ABM
10	E	Calidad: Preservar la mejor calidad del agua a reusar	ABM
11	E	Ergonomía: Atención a la norma NTP 226	ABM
12	D	Reciclaje: Reutilizar el mayor volumen posible de agua y detergente	ABM

Tabla 2.1 Lista de requerimientos en la norma VDI 2121

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.3.2 Estructura de funciones

Teniendo que el requerimiento sistematiza lo que es una práctica empírica de reciclaje de aguas grises efluentes de máquina de lavado, se explica el proceso a continuación. (Ver figura 2.2).

1) Se carga prendas claras y ligeras para el ciclo normal de lavado (1 ciclo de lavado y tres, de enjuague).
2) Estando seleccionada la carga de agua fría, se elige el ciclo de lavado profundo (exhaustivo).
3) Se establece el nivel de agua.
4) Comienza la admisión de agua.
5) Se adiciona el detergente, (aproximadamente 350 gr).
6) Inicia el ciclo de lavado.
7) Completa el ciclo de lavado y evacua el agua gris.

Proceso de reciclaje – almacenamiento de agua gris

a) Se almacena el agua gris del primer ciclo de lavado (agua gris 1 con detergente)

Continua el ciclo de lavado exhaustivo

8) Carga agua y realiza el primer ciclo de enjuague
9) Descarga agua gris 2 (agua clara)
10) Carga agua para el segundo ciclo de enjuague
11) Descarga agua gris 3 (agua clara)
12) Carga agua para el tercer ciclo de enjuague
13) Descarga agua gris 4 (agua clara)

Proceso de reciclaje – reutilización de agua gris

Se abastece la lavadora, desde la admisión para agua caliente, con el agua gris almacenada

Continua desde el paso 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 (ya no almacena el agua gris).

14) Apaga el equipo

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

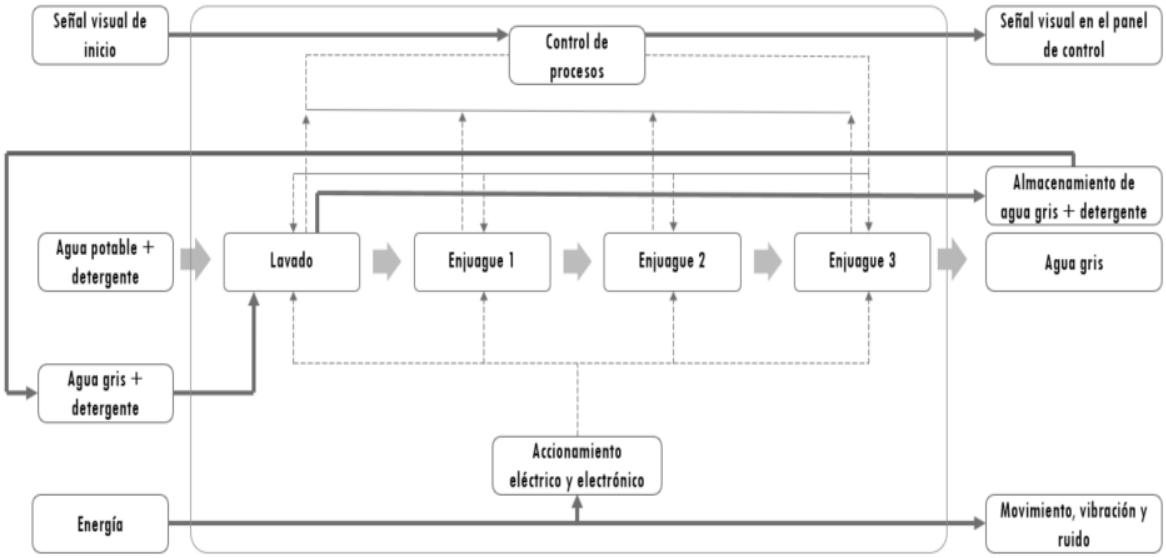
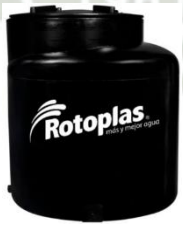


Figura 2.2 Estructura de funciones

2.3.3 Matriz morfológica

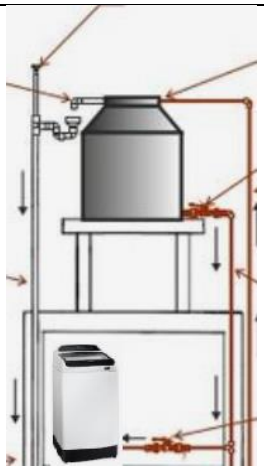
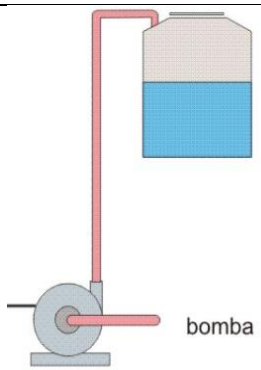
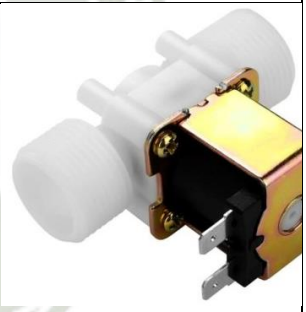
Atendiendo a la metodología del diseño, se construye la matriz de la cual se derivan las alternativas de solución para el diseño. Esta matriz se refiere a la Figura 2.3

	Funciones	**Portadores de funciones**	
		Solución 1	**Solución 2**
1	Recipientes para almacenamiento	1 tanque de 250 lt 	1 balde plástico de 90 lt y 1 tanque de 250 lt

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2	Carga de agua gris (para reutilizar)		
3	Control		
4	Válvulas		
5	Control de volumen de agua		

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

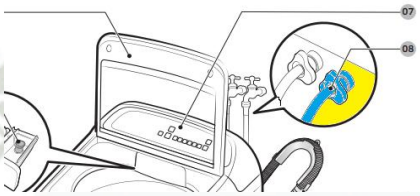
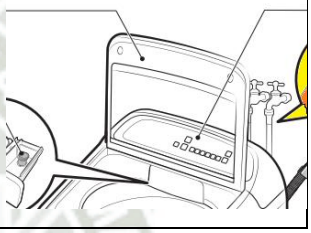
6	Bombeo de aguas grises		
7	Admisión de agua para la reutilización		

Figura 2.3 Matriz morfológica

2.3.4 Conceptos de solución

Alternativa 1

Lavado de prendas ligeras y claras

Teniendo que un ciclo completo de lavado comprende a su vez 4 etapas, la primera, corresponde al lavado propiamente dicho, para lo cual la carga de agua potable alcanza en promedio 90 litros. Completada la admisión del agua se agrega, aproximadamente, 350 gramos de detergente en polvo. Al terminar esta primera etapa, el agua gris resultante, que contiene detergente con características que permite que sea reutilizada para un segundo ciclo, se almacena en un tanque bajo. Este recipiente tiene un sensor electrónico de boya el que, al llegar al límite de agua preestablecido, permite activar una bomba para extraer el agua gris y trasladarla a un tanque elevado, el cual también tiene un sensor de boya, que inactiva la bomba cuando llega al límite configurado.

Luego de almacenar el agua gris, las restantes tres etapas de enjuague se suceden como está programado en la máquina de lavar.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Reutilización del agua gris en el lavado de prendas pesadas y oscuras

Para reutilizar el agua gris en un nuevo ciclo de lavado de prendas más pesadas, se activa en el panel de control de la lavadora la admisión de agua caliente, es por esa entrada que se admite el agua gris, ingresando a la tina de la lavadora impulsada por gravedad, desde el tanque elevado. Una vez completada la carga, las etapas de lavado y enjuague continúan sin almacenar nuevamente el agua gris.

La reutilización de agua gris usualmente se da por una vez, excepcionalmente, se recicla por segunda vez.

Alternativa 2

Lavado de prendas ligeras y claras

Este ciclo de lavado de prendas ligeras cumple los mismos requisitos de la alternativa 1, teniendo diferencia únicamente en el proceso de reutilización del agua gris almacenada en el tanque elevado.

Reutilización del agua gris en el lavado de prendas pesadas y oscuras

Para reutilizar el agua gris en un nuevo ciclo de lavado de prendas más pesadas, se activa en el panel de control de la lavadora la admisión de agua caliente, es por esa entrada que se admite el agua gris, ingresando a la tina de la lavadora impulsada una bomba para incrementar la velocidad de carga para iniciar el ciclo de lavado. Una vez completada la carga, las etapas de lavado y enjuague continúan sin almacenar nuevamente el agua gris.

La reutilización de agua gris usualmente se da por una vez, excepcionalmente, se recicla por segunda vez.

2.4 Diseño de componentes del sistema hidráulico de reutilización de aguas grises provenientes de máquina de lavado

Para lograr un diseño apropiado del sistema que estamos abordando, en primer lugar, procederemos a analizar los componentes que ejercerán influencia en el proyecto. Después de examinar cada uno de estos elementos, podemos identificar y escoger los componentes más adecuados.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.4.1 Bomba Centrífuga

Una máquina conocida como bomba centrífuga, también referida como bomba rotodinámica, tiene como objetivo principal convertir la energía en velocidad y, posteriormente, transformarla en energía de presión. En otras palabras, su función es convertir la energía mecánica en energía hidráulica, permitiendo así desplazar la mayor cantidad de líquido posible. Ver figura 2.4

Figura 2.4 Bomba centrífuga simple.
Fuente: INOXMIN Process. www.inoxmim.com

Una bomba centrífuga comúnmente complementa otras instalaciones hidráulicas, ya sea en entornos industriales, comerciales o residenciales, dependiendo del tipo de bomba centrífuga seleccionada. Su propósito principal es ofrecer una solución práctica a la falta de presión en el suministro de agua en lugares donde no hay una elevada pendiente, ya que en tales casos se recurriría a otros sistemas.

En cuanto al funcionamiento de una bomba centrífuga, este es particularmente sencillo. En primera instancia, el líquido ingresa a través del rodete o impulsor, donde unos álabes dirigen el fluido y, gracias a la fuerza centrífuga, lo expulsan hacia el exterior. Una vez en el exterior, la carcasa se encarga de recoger el líquido. (Fig. 2.5).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

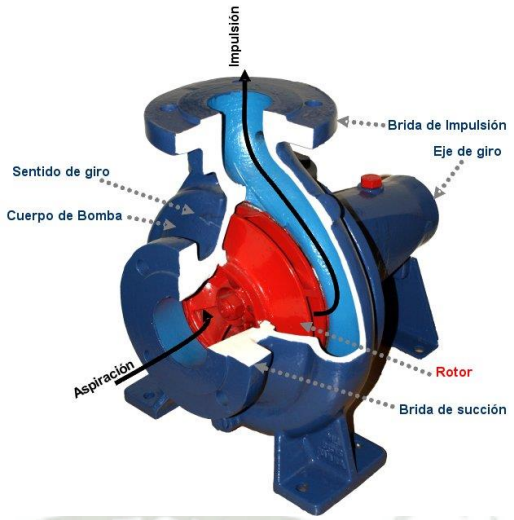


Figura 2.5 Funcionamiento de una bomba centrífuga

Fuente: Fuente: Fuente: Fluideco www.fluideco.com

Ecuación ideal de Bernoulli

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2 \cdot g}$$

Donde:

$P1, P2$: *Presión estática del fluido* (Pa)

γ: *Peso Específico del Fluido* $\left(Kg - \frac{f}{m3}, \frac{N}{m3}\right)$

$Z1, Z2$: *Alturas referencia* (m, pie)

$V2, V1$: *Velocidad del Fluido* (m/s)

2.4.2 Tanque tina Rotoplas

Un tanque tina es un recipiente de polietileno que típicamente se coloca en la parte superior de las viviendas. Estos poseen una gran capacidad para almacenar agua y suministrarla a las habitaciones o pisos correspondientes. Ver figura 2.6.

Están compuestos por varias capas, entre las cuales se incluyen:

- Capa Expel: diseñada para inhibir la reproducción de bacterias.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Capa blanca: proporciona un revestimiento suave en el interior del tinaco, facilitando la limpieza.
- Capa negra: actúa como un escudo protector contra los rayos UV del sol, evitando la proliferación de microorganismos en el interior del tinaco.
- Capa beige: contribuye a la protección del sistema y extiende su vida útil.

Figura 2.6 Tanque tina Rotoplas 250 L.
Fuente: Rotoplas www.rotoplas.com.pe

2.4.3 Control de nivel tipo boya

Los dispositivos denominados controles de nivel, también reconocidos como "interruptores de nivel" o "sensores de boya", (Fig. 2.7), son instrumentos que operan mediante un interruptor de contacto (reed switch) en combinación con un flotador magnético. La acción del flotador, al moverse, provoca la apertura o cierre del contacto eléctrico. Estos sensores ofrecen soluciones versátiles y económicas para la automatización de procesos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 2.7 Control de nivel tipo boya.
Fuente: Automaq Corporation SAC. www.automaq.pe

2.4.4 Electroválvulas

Cuando nos referimos a una electroválvula, estamos hablando de un dispositivo electromecánico diseñado para regular el flujo en un conducto. Por lo general, cuenta únicamente con las posiciones de abierto y cerrado. La operación de estas válvulas se realiza a través de una bobina solenoide, distinguiéndolas así de las válvulas motorizadas, las cuales emplean un motor para activar el mecanismo y tienen la capacidad de adoptar posiciones abiertas o cerradas. Ver figura 2.8.

Figura 2.8 Electroválvula de 24 V.
Fuente: Arco. www.valvulasarco.com

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.4.5 Válvulas antirretorno

Las válvulas anti-retorno, conocidas también como válvulas de retención, válvulas uniflujo o válvulas check, tienen la finalidad de bloquear completamente el flujo de un fluido, ya sea gaseoso o líquido, en una dirección, permitiendo al mismo tiempo un paso libre en la dirección opuesta. Una de sus ventajas es la mínima distancia que recorre el disco u obturador hasta alcanzar la posición de apertura total.

Figura 2.9 Válvula Check.
Fuente: Ferrobell. www.ferrobell.com

2.4.6 Interruptores termomagnéticos

El interruptor termomagnético es un mecanismo que interrumpe automáticamente la corriente eléctrica en un circuito. Su acción se desencadena cuando la corriente supera el valor nominal establecido en las especificaciones técnicas del dispositivo.

Su propósito es resguardar y brindar seguridad a la instalación eléctrica frente a posibles fallos. Estos interruptores automáticos presentan una ventaja en comparación con los fusibles, ya que no requieren ser reemplazados cada vez que entran en funcionamiento. Ver figura 2.10.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 2.10 Interruptor termomagnético.

Fuente: Global Electric Solar. https://globalelectricsolar.com.pe

2.4.7 Interruptor eléctrico

Los interruptores eléctricos son dispositivos diseñados para modificar o bloquear el flujo de corriente eléctrica. Varían desde interruptores simples que encienden o apagan una luz hasta complejos selectores de transferencia automáticos de varias capas controlados por computadoras.

La figura 2.11 muestra un ejemplo de interruptor eléctrico. Los materiales utilizados en su fabricación se seleccionan en función de la vida útil prevista del interruptor. En la mayoría de los interruptores domésticos, se emplea una aleación de latón o aluminio para resistir la corrosión.

Figura 2.11 Interruptor eléctrico.

Fuente: Bricos. https://www.bricos.com

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.4.8 Transformadores

Un transformador es un componente eléctrico que posibilita el incremento o reducción de la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, conservando al mismo tiempo la potencia. En un transformador ideal, es decir, sin pérdidas, la potencia que entra en el dispositivo es igual a la que se obtiene en la salida. Sin embargo, en las máquinas reales, se observa un pequeño porcentaje de pérdidas, el cual varía según su diseño, tamaño y otros factores. Figura 2.12.

Figura 2.12 Transformador de tensión.

Fuente: Ceyesa. https://www.ceyesa.com

2.4.9 Cable eléctrico (calibre 16)

Se trata de un tipo de cable extremadamente fino empleado en ciertos ensamblajes eléctricos con un consumo de energía muy bajo. La figura 2.13 muestra un ejemplo de un cable eléctrico calibre 16 (Fuente: cablesyconductores.com). A través del sistema métrico decimal, se establece que el diámetro del material conductor en este cable calibre 16 es de 1.5 mm^2.

Debido a su delgadez, este cable tiene una aplicación limitada en diversas instalaciones eléctricas y, además, presenta una resistencia inferior en comparación con los calibres de numeración más baja.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 2.13 Cable eléctrico (calibre 16)
Fuente: INDECO. https://www.promelsa.com.pe

2.4.10 Tuberías PVC

Las iniciales PVC corresponden a cloruro de polivinilo, un plástico blanco y rígido empleado en sistemas de desagüe sanitario, tuberías de ventilación y trampas de desagüe tanto en entornos domésticos como comerciales. Se trata de un tubo resistente, robusto y químicamente resistente que se utiliza con frecuencia para reparar secciones de tubería de hierro fundido que estén deterioradas.

La figura 2.14 muestra ejemplos de tuberías de PVC. Este tipo de tubería puede cortarse fácilmente con una sierra de arco o un cortador de tubería. Las secciones se unen mecánicamente mediante sujetadores de presión fabricados con plástico que se pueden retirar, o bien, se conectan de manera permanente utilizando un solvente químico especial.

Es importante destacar que, a pesar de su apariencia similar, la tubería de PVC difiere de la tubería CPVC (cloruro de polivinilo clorinado), que se utiliza específicamente para el suministro de agua.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 2.14 Tubos PVC para instalaciones sanitarias

Fuente: TURFLEX. https://www.turflexperu.com

2.5 Diagrama del prototipo de sistema hidráulico para reutilización de aguas grises

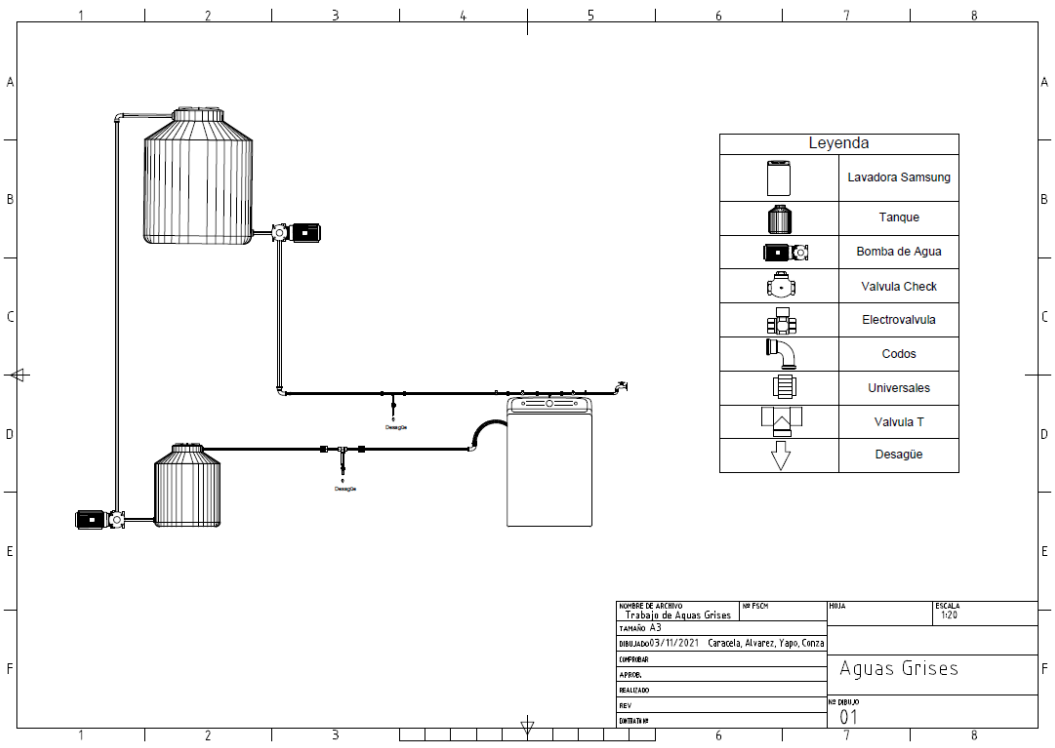


Figura 2.15 Sistema hidráulico para reutilización de aguas grises

Fuente: (Equipo Hidro), Caracela, Álvarez, Yapo, Conza, 2021.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.6 Diseño del circuito eléctrico base del tablero de control

Para asegurar un desempeño adecuado de los circuitos eléctricos, se empleó el software FLUIDSIM -> PARTE ELÉCTRICA. Este software proporciona una representación visual del montaje en situaciones reales. Se destaca por ofrecer un sistema de emulación completo y fácil de manejar. El usuario solo tiene que introducir los símbolos de manera ordenada, y el programa evalúa los estados de los componentes eléctricos para luego resaltar los conductores eléctricos. Figura 2.16.

La primera etapa consiste en reconocer los componentes a emplear, los cuales incluyen interruptores eléctricos accionados mecánicamente, indicadores LED de varios colores, sensores de nivel tipo boya y la bomba de agua. Posteriormente, utilizando la interfaz educativa se elabora el esquema del sistema. Una vez completadas las conexiones, se procede a la compilación, donde se observa el funcionamiento del sistema.

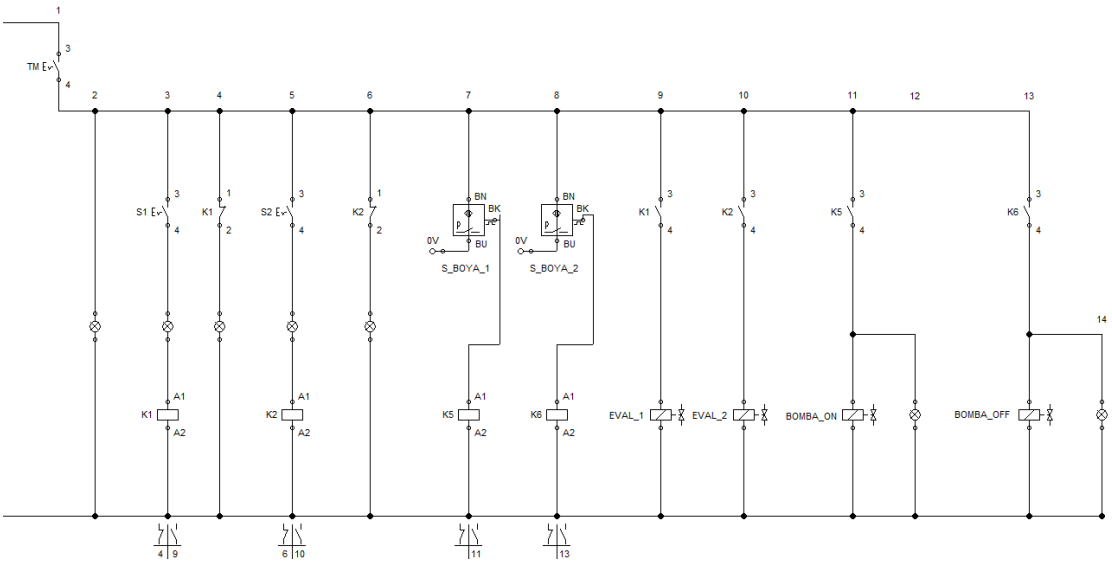


Figura 2.16 Circuito eléctrico del tablero de control del sistema hidráulico

Fuente: (Equipo Hidro), Caracela, Álvarez, Yapo, Conza, 2021.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Activación del sistema eléctrico y conmutación de la electroválvula 1

En la vista, la electroválvula 1 está activada, lo que significa que la válvula 2 está en posición cerrada. La finalidad de esta configuración es expulsar las aguas grises a través de la salida, es decir, se está eliminando del circuito cerrado. Figura 2.17.

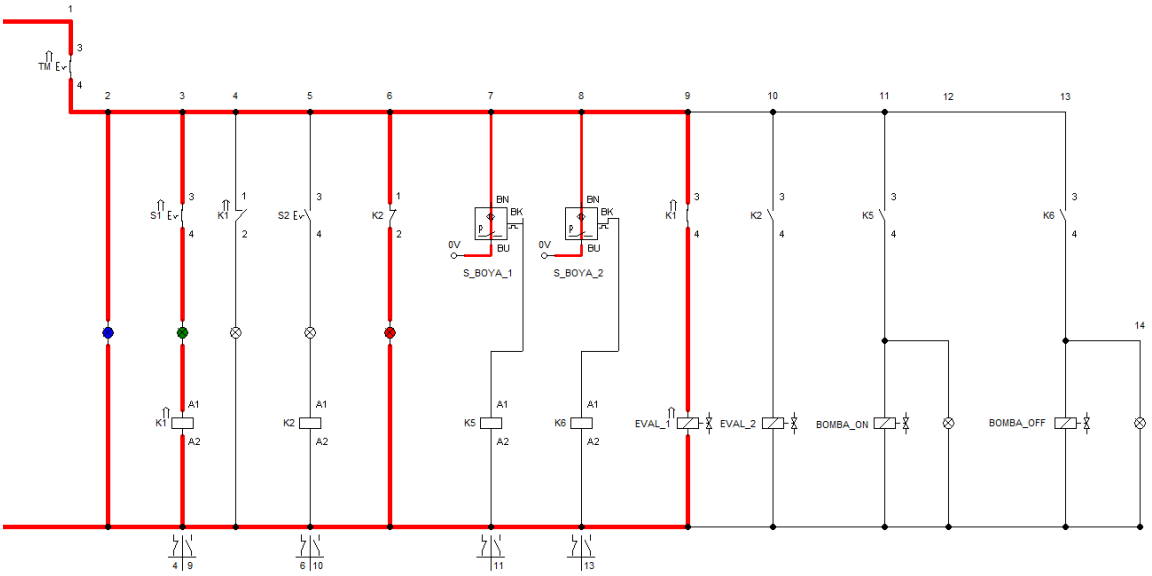


Figura 2.17 Electroválvula 1 conmutada

Fuente: (Equipo Hidro), Caracela, Álvarez, Yapo, Conza, 2021.

Electroválvula 1 cerrada y electroválvula 2 conmutada

De manera opuesta, la válvula 2 se encuentra activada mientras que la válvula 1 está en posición cerrada. La finalidad de esta configuración es permitir el paso de las aguas grises hacia el depósito de 90 litros, con el propósito de redirigirlo hacia el tanque Rotoplas. Esta disposición satisface las condiciones necesarias para el funcionamiento del circuito cerrado. Figura 2.18.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos

En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

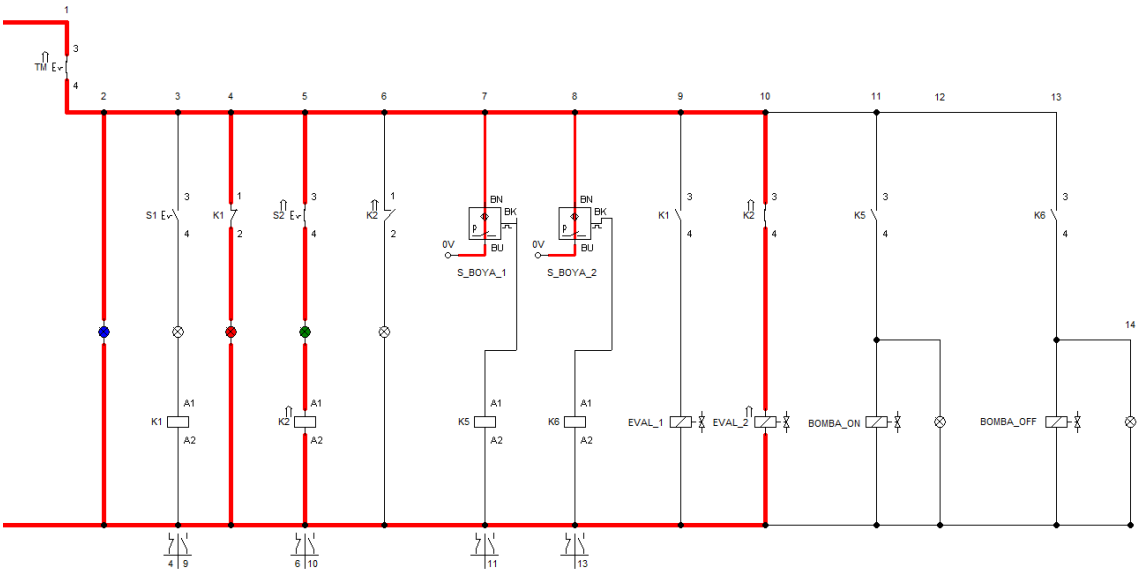


Figura 2.18 Electroválvula 2 conmutada

Fuente: (Equipo Hidro), Caracela, Álvarez, Yapo, Conza, 2021.

Electroválvula 2 conmutada a la par del primer interruptor de nivel.

Al llenar el depósito de 90 litros, la combinación 2 se pone en marcha, activada por el sensor de nivel y encendiendo automáticamente la bomba. En este punto, las aguas grises pasan a ser bombeadas al tanque Rotoplas. Figura 2.19.

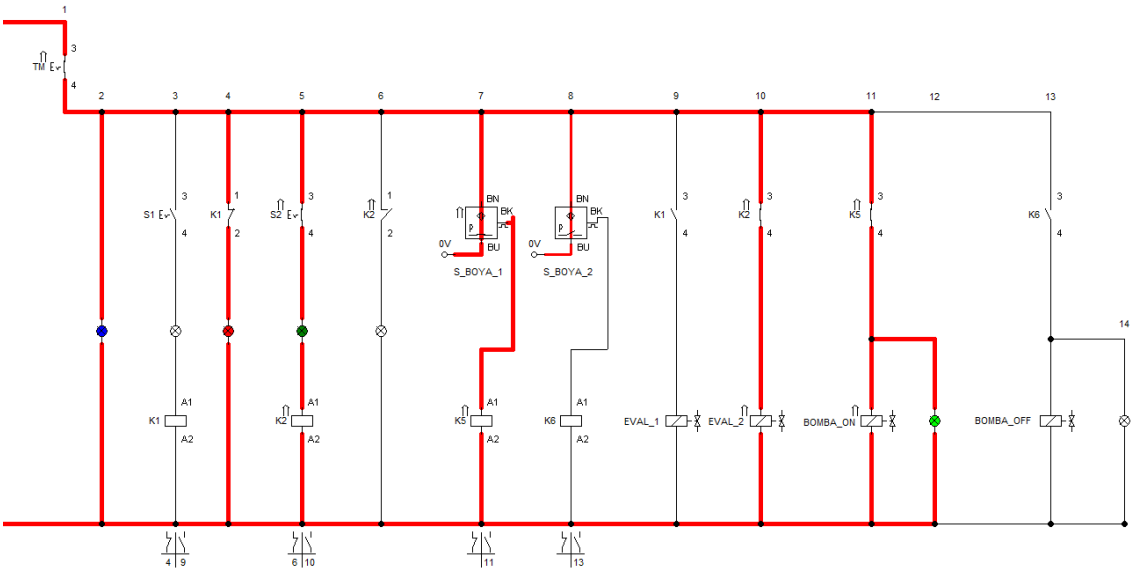


Figura 2.19 Sensor de nivel 1 conmutado

Fuente: (Equipo Hidro), Caracela, Álvarez, Yapo, Conza, 2021.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Electroválvula 2 conmutada por la conmutación del segundo interruptor de nivel.

La disposición de las válvulas permanece constante. Una vez que el depósito elevado se llena, se activa el segundo sensor de nivel, lo que resulta en la desconexión de la bomba centrífuga. En este momento, el sistema está preparado para reutilizar el agua gris en la lavadora. Figura 2.20.

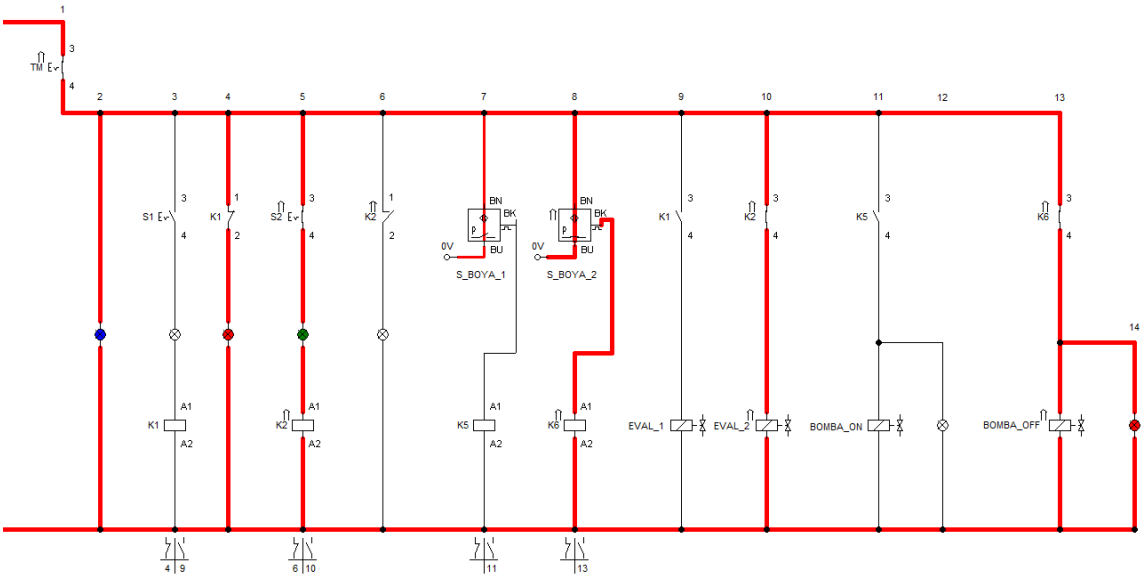


Figura 2.20 Sensor de nivel 2 conmutado

Fuente: (Equipo Hidro), Caracela, Álvarez, Yapo, Conza, 2021.

Diagrama unifilar

En cuanto al Diagrama Unifilar, es importante destacar que el circuito opera con voltajes de 220V y 24V. Para comprender mejor la alimentación principal de 220V, se ha elaborado un diagrama unifilar. Figura 2.21.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

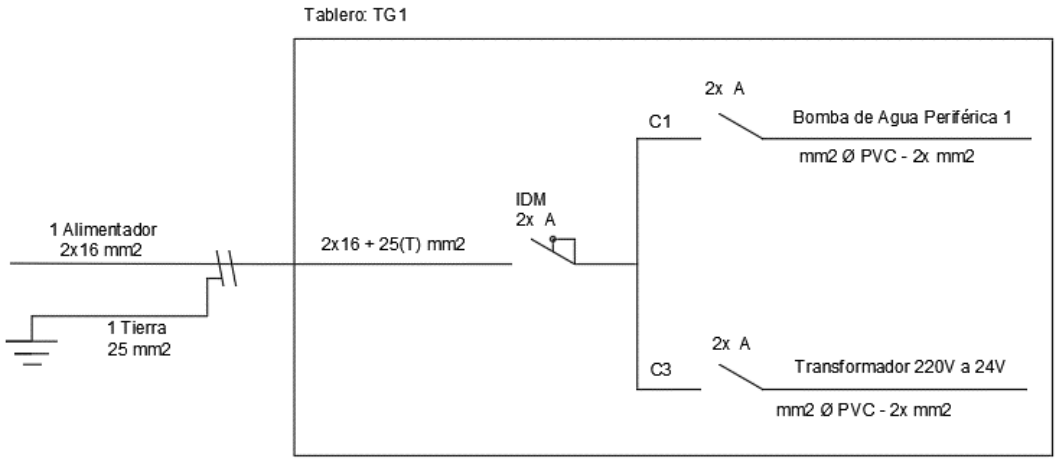


Figura 2.21 Diagrama unifilar

Fuente: (Equipo Hidro), Caracela, Álvarez, Yapo, Conza, 2021.

2.7 Cálculo para la selección de la bomba

Para elegir adecuadamente una bomba, es fundamental llevar a cabo cálculos fundamentados en los principios de la mecánica de fluidos. Utilizando estos resultados, se puede examinar el mercado y escoger una bomba que cumpla con los requisitos y cálculos previamente sustentados.

Curva del sistema

$$H_B = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + Z_2 - Z_1 + \frac{{V_2}^2 - {V_1}^2}{2g} + (f\frac{L}{D} + \Sigma K) * \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g}$$

Es esencial identificar los parámetros que se sustituirán en esta ecuación, y se deben tener en cuenta ciertas consideraciones:

La presión en ambos tanques se asume como la presión atmosférica, dado que están abiertos y no presentan ningún tipo de presurización.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Aunque la altura real de bombeo oscila entre 3 m y 6 m, se plantea emplear 10 m para proporcionar un margen de trabajo y permitir la expansión a alturas mayores en instalaciones futuras.

En los tanques abiertos, el agua permanece en reposo, por lo que la velocidad se considera nula (0 m/s).

El factor "f" se obtiene del diagrama de Moody para tuberías de PVC, aproximadamente 0.014.

La suma de las constantes "K" de los accesorios en las tuberías se estima alrededor de 2, lo cual es suficiente para abarcar la extensión de la tubería analizada.

Se trabajó con el diámetro de 1 pulgada, coincidiendo con las dimensiones comunes de las bombas disponibles en el mercado.

La longitud de la tubería puede extenderse hasta 20 m para el análisis, considerando posibles aplicaciones futuras y mejoras en el diseño.

La gravedad en Arequipa se calcula en 9.7773 m/s².

$$H_B = \frac{P_{atm} - P_{atm}}{\gamma} + 10m + (0.014\frac{20m}{0.0254m} + 2) * \frac{8Q^2}{\pi^2 \, x \, 0.0254^4 \, x \, 9.7773}$$

$$H_B = 10 + 2585342.9Q^2$$

Se tabuló y organizó esta información en una tabla, donde se ingresaron valores aproximados y reales del caudal. Estos valores se sustituyeron en la fórmula correspondiente con el fin de determinar la curva del sistema. Tabla 2.2.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Q (l/min)	Q (m3/s)	H (m)
5	0.00008335	10.01796
10	0.0001667	10.07184
15	0.00025005	10.16165
20	0.0003334	10.28738
25	0.00041675	10.44902
30	0.0005001	10.64659
35	0.00058345	10.88009
40	0.0006668	11.14950
45	0.00075015	11.45484

Tabla 2.2 Curva del sistema.

Fuente: (Equipo Hidro), Caracela, Álvarez, Yapo, Conza, 2021.

Con el propósito de calcular la potencia eléctrica necesaria para la bomba, se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se han elegido valores correspondientes a un caudal medio y real que se alinean con el diseño del proyecto.
- Se asume una eficiencia del 75% para la bomba proyectada, como medida conservadora.
- La eficiencia eléctrica se estima en un 80%, también como medida conservadora.

$$P_{EJE} = \frac{\gamma . Q . H_B}{76\,\eta}$$

$$P_{EJE} = \frac{1000\ \frac{kg}{m^3} * 0.0005001\ \frac{m^3}{s} * 10.64659\ m}{76 * 0.75}$$

$$P_{EJE} = 0.1\ HP$$

$$P_{ELÉCTRICA} = \frac{P_{EJE}}{\eta_{ELE}}$$

$$P_{ELÉCTRICA} = 0.2\ HP$$

Con estos hallazgos, se procura encontrar en el mercado local una bomba con una potencia mínima de 0.2 HP. Sin embargo, debido a la escasez de proveedores y las

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

características de diseño de las bombas disponibles, la potencia mínima identificada en el mercado es de 0.5 HP. Tabla 2.3.

Ficha técnica	
Características	Cuerpo de hierro fundido, impulsor de latón con protector térmico incorporado, eje rotor montado en rodamientos y sello mecánico grafito cerámico. Para casas de 2 a 3 pisos
Marca	Humboldt
HP (Horse Power)	0.5
Altura máxima	32 m
Voltaje	220 V
Frecuencia	60 Hz
Caudal máx.	32 L/min
Velocidad de motor	3450 RPM
Tipo de conexión	Monofásico
Color	Azul
Uso	Ideal para bombear agua limpia y líquidos no corrosivos. Aumenta la presión domiciliaria, acumulación de agua en estanques y riego de jardines
Garantía	3 años
Procedencia	China
Recomendaciones	Instalar en lugares cerrados o al menos debe protegerse de las inclemencias del clima. Verifique que el voltaje de alimentación coincida con el de la máquina, no olvide adquirir: Unión PVC, válvula de pie, terminal de PVC y tubos de PVC para el armado de la bomba
Tipo	Bombas Periféricas
Manual de Producto	VER FICHA
Información del Producto	Ver manual
Categoría	Bombas y motobombas
Familia	Plomería/gasfitería

Tabla 2.3 Ficha técnica de una bomba de 0,5 HP.

Fuente: Humboldt.

En relación con la información proporcionada sobre la bomba HUMBOLDT de 0.5 HP, la ficha técnica destaca aspectos significativos, como:

Una altura máxima de bombeo de 32 m, lo cual excede nuestra necesidad de altura y resulta beneficioso para posibles ajustes en el diseño y mayores opciones.

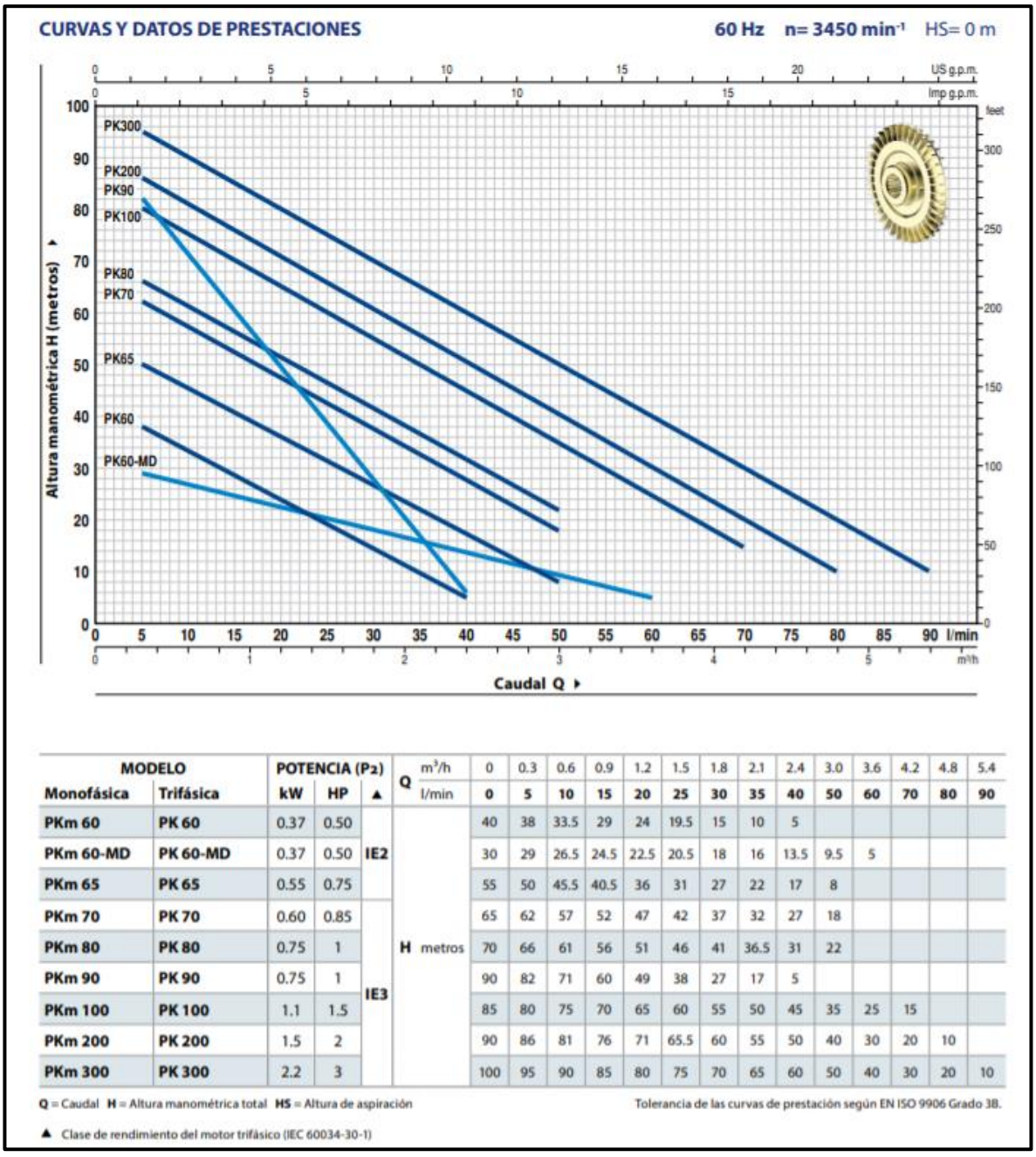
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Un caudal máximo de 32 L/min, un valor que también se ajusta a las especificaciones de nuestro diseño.

Además, se presenta la curva de rendimiento aproximada de la bomba para este diseño. Figura 2.22.



MODELO		POTENCIA (P2)			Q m³/h	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4
Monofásica	Trifásica	kW	HP	▲	l/min	0	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
PKm 60	PK 60	0.37	0.50	IE2	H metros	40	38	33.5	29	24	19.5	15	10	5					
PKm 60-MD	PK 60-MD	0.37	0.50			30	29	26.5	24.5	22.5	20.5	18	16	13.5	9.5	5			
PKm 65	PK 65	0.55	0.75			55	50	45.5	40.5	36	31	27	22	17	8				
PKm 70	PK 70	0.60	0.85	IE3		65	62	57	52	47	42	37	32	27	18				
PKm 80	PK 80	0.75	1			70	66	61	56	51	46	41	36.5	31	22				
PKm 90	PK 90	0.75	1			90	82	71	60	49	38	27	17	5					
PKm 100	PK 100	1.1	1.5			85	80	75	70	65	60	55	50	45	35	25	15		
PKm 200	PK 200	1.5	2			90	86	81	76	71	65.5	60	55	50	40	30	20	10	
PKm 300	PK 300	2.2	3			100	95	90	85	80	75	70	65	60	50	40	30	20	10

Q = Caudal H = Altura manométrica total HS = Altura de aspiración

Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO 9906 Grado 3B.

▲ Clase de rendimiento del motor trifásico (IEC 60034-30-1)

Figura 2.22 Diagrama curvas y datos de rendimiento

Fuente: PK Electrobombas.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.8 Propuesta económica para la construcción del sistema hidráulico

Alternativa 1

El costo de insumos y equipos se hizo ante proveedores locales, resultando en precios referenciales a inicios del 2022. La tasa de variación, que considera un incremento sustancial alcanza el orden de 35% aproximadamente (noviembre de 2023), sobre lo estimado por entonces. Ver tabla 2.4.

Producto	Descripción	Cantidad	Precio Nov.2021	Costo Total
Bomba Centrífuga	B.C. 0.5 HP Karson	2	S/ 230.00	**S/ 460.00**
Cilindro	Cilindro de 80L (F.Altiplano)	1	S/ 45.00	**S/ 45.00**
Bidón	Bidón de 35L (F. Altiplano)	1	S/ 18.00	**S/ 18.00**
Transformador	Transformador 24v	1	S/ 25.00	**S/ 25.00**
Tubo Gris	Tubo PVC gris de 1/2"x5m SP	2	S/ 14.00	**S/ 28.00**
Tubo Gris	Tubo PVC gris de 1"x5m CR. PAVCO	2	S/ 35.50	**S/ 71.00**
Codo 90°	Codo PVC 1"x90° SP	4	S/ 5.50	**S/ 22.00**
Codo 90°	Codo PVC 1/2"x90° SP	5	S/ 1.50	**S/ 7.50**
Valvula Tee	Tee PVC 1" SP	3	S/ 9.00	**S/ 27.00**
Valvula Tee	Tee PVC 1/2" SP	2	S/ 1.60	**S/ 3.20**
Niple	Niple PVC 1"x1/2"	12	S/ 1.20	**S/ 14.40**
Teflón	Cinta Teflón 1/2"	10	S/ 1.90	**S/ 19.00**
Formador de Empaquetadura	Formador de empaquetadura, Adex	1	S/ 19.90	**S/ 19.90**
Unión Universal	Union Universal 1/2" PVC	6	S/ 4.50	**S/ 27.00**
Unión Universal	Union Universal 1" PVC	2	S/ 10.50	**S/ 21.00**
Válvula Check	V. Check 1/2"	2	S/ 30.00	**S/ 60.00**
Válvula Check	V. Check 1"	2	S/ 112.90	**S/ 225.80**
Válvula Canastilla	V. Check Canastilla	1	S/ 37.90	**S/ 37.90**
Válvula Solenoide	V. Unidireccional eléctrica 24v	5	S/ 25.00	**S/ 125.00**
Interruptor termomagnético	Interruptor Termomagnetico Legrand	1	S/ 38.20	**S/ 38.20**
Sensor tipo Boya	Automático de nivel Humboldt	2	S/ 19.90	**S/ 39.80**
Botón Emergencia	Pulsador Seta Rojo	1	S/ 15.00	**S/ 15.00**
Cable N°16	Rollo de Cable automotriz N°16	0.65	S/ 160.00	**S/ 104.00**
Tablero	Tablero de madera	1	S/ 30.00	**S/ 30.00**
Imprevistos				**S/ 74.19**
			TOTAL	**S/ 1,097.89**

Tabla 2.4 Cálculo de costos incorporando dos bombas periféricas.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Alternativa 2

Producto	Descripción	Cantidad	Precio Aproximado	Costo Total
Bomba Centrífuga	B.C. 0.5 HP Karson	1	S/ 160.00	**S/ 160.00**
Tanque	Tanque 250 L (sodimac)		S/ 350.00	**S/ 0.00**
Balde Multiuso	Balde 50L (sodimac)		S/ 38.00	**S/ 0.00**
Balde Multiuso	Balde 60L (sodimac)		S/ 90.00	**S/ 0.00**
Cilindro	Cilindro de 80L (F.Altiplano)	1	S/ 45.00	**S/ 45.00**
Cilindro	Cilindro de 120L (F.Altiplano)		S/ 90.00	**S/ 0.00**
Bidon	Bidon de 35L (F. Altiplano)	1	S/ 18.00	**S/ 18.00**
				S/ 0.00
Transformador	Transformador 24v	1	S/ 25.00	**S/ 25.00**
				S/ 0.00
Tubo Gris	Tubo PVC gris de 1/2"x5m CR. PAVCO	1		**S/ 0.00**
Tubo Gris	Tubo PVC gris de 1"x5m CR. PAVCO	1	S/ 35.00	**S/ 35.00**
Codo 90°	Codo PVC 3/4"x90° SP	4	S/ 3.00	**S/ 12.00**
Niple	Niple 3/4"x1"	0	S/ 1.50	**S/ 0.00**
Teflón	Cinta Teflón 1/2"	1	S/ 1.70	**S/ 1.70**
Unión Universal	Union Universal 1/2" SP	6	S/ 5.30	**S/ 31.80**
Unión Universal	Union Universal 1"	5	S/ 10.50	**S/ 52.50**
				S/ 0.00
Válvula Check	V. Check 1/2"	0	S/ 15.00	**S/ 0.00**
Válvula Check	V. Check 1"	1	S/ 30.00	**S/ 30.00**
Válvula Canastilla	V. Check Canastilla	1	S/ 30.00	**S/ 30.00**
				S/ 0.00
Válvula T eléctrica	Valvula T eléctrica de 220v	0	S/ 50.00	**S/ 0.00**
Válvula Unidimensional	V. Unidireccional eléctrica 12 y 24v	5	S/ 25.00	**S/ 125.00**
Válvula Unidimensional	V. Unidireccional electrica 220v	0	S/ 20.00	**S/ 0.00**
Interruptor termomagnético	Interruptor Termomagnético Legrand	1	S/ 35.70	**S/ 35.70**
Sensor tipo Boya	Automático de nivel Humboldt	2	S/ 20.00	**S/ 40.00**
Sensor acustico	Bocina	0	S/ 10.00	**S/ 0.00**
		0		**S/ 0.00**
Botón Emergencia	Pulsador Seta Rojo	1	S/ 15.00	**S/ 15.00**
Cable N°16	Rollo de Cable automotriz N°16	0.2	S/ 160.00	**S/ 32.00**
Pegamento	Pegamento PVC (sodimac)	1	S/ 12.50	**S/ 12.50**
Tablero	Tablero de madera	1	S/ 30.00	**S/ 30.00**
			TOTAL	**S/ 731.20**

Tabla 2.5 Cálculo de costos incorporando una sola bomba periférica.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Capítulo 3

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Valoración técnico-económica

La valoración técnica y económica considera la ponderación de todas características a evaluar.

Como en todo proceso de cuantificación, primero se colocan las características a evaluar, en nuestro caso, se consideran las variables apropiadas tales como, capacidad de producción, eficiencia y efectividad, seguridad, confiabilidad, modularidad, maniobrabilidad, espacio ocupado, facilidad de mantenimiento y facilidad de montaje. Estas características son evaluadas para cada una de las dos alternativas propuestas, con una valoración de 0 a 4. La ponderación de cada una de las características se da en función de la importancia relativa de una característica con respecto a otra, valorando la ponderación en una escala de 0 a 4. El valor total de la cuantificación por alternativa se muestra en la tabla 2.1, en donde las valoraciones de las ponderaciones y cada posible solución son presentadas.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 3.1 Valoración Técnica

Valor técnico (Xi)							
Variantes de concepto/proyecto		**Alternativa 1**		**Alternativa 2**		**Solución ideal**	
	Ponderación	**Puntaje**		**Puntaje**		**Puntaje**	
Capacidad de producción	4	4	16	4	16	4	16
Eficiencia y efectividad	4	3	12	4	16	4	16
Seguridad	4	4	16	4	16	4	16
Confiabilidad	4	3	12	3	12	4	16
Modularidad	2	2	4	2	4	4	8
Maniobrabilidad	4	3	12	4	16	4	16
Espacio ocupado	4	3	12	3	12	4	16
Facilidad de mantenimiento	3	2	6	3	9	4	12
Facilidad de montaje	3	3	9	3	9	4	12
Puntaje máximo	32	27	99	30	110	36	128
Valor técnico Xi		0.84		0.94		1.00	
Orden		2		1		3	

La valoración económica de cada una de las alternativas se muestra en la Tabla 3.2. Los criterios de evaluación considerados son, inversión inicial, vida útil, operación, mantenimiento y eficiencia. Se observa que la alternativa 2, resulta elegible por ser mejor más cercana a la solución ideal.

Tabla 3.2 Valoración económica

Valor técnico (Yi)							
Variantes de concepto/proyecto		**Alternativa 1**		**Alternativa 2**		**Solución ideal**	
	Ponderación	**Puntaje**		**Puntaje**		**Puntaje**	
Inversión inicial	4	4	16	3	12	4	16
Vida útil	3	3	9	3	9	4	12
Operación	4	3	12	4	16	4	16
Mantenimiento	3	2	6	3	9	4	12
Eficiencia	3	3	9	3	9	4	12
Puntaje máximo	17	15	52	16	55	20	68
Valor técnico Yi		0.88		0.94		1.00	
Orden		2		1		3	

Es insuficiente un análisis puramente técnico o económico. Lo que se pretende en ese tipo de análisis es establecer un equilibrio entre ambas dimensiones. Para ello, lo que la norma VDI 2221 señala, es que se debe graficar los valores técnicos en las abscisas y los económicos, en las ordenadas. Lo que se graficará, es un punto para cada una de las alternativas, en donde la mejor alternativa será aquella que se acerque más a la curva x=y. Así como se muestra en la Figura 3.1, en donde se observa que la solución 2, se aproxima

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

mejor y por consiguiente resulta más cercana a la solución ideal, siendo la solución seleccionada.

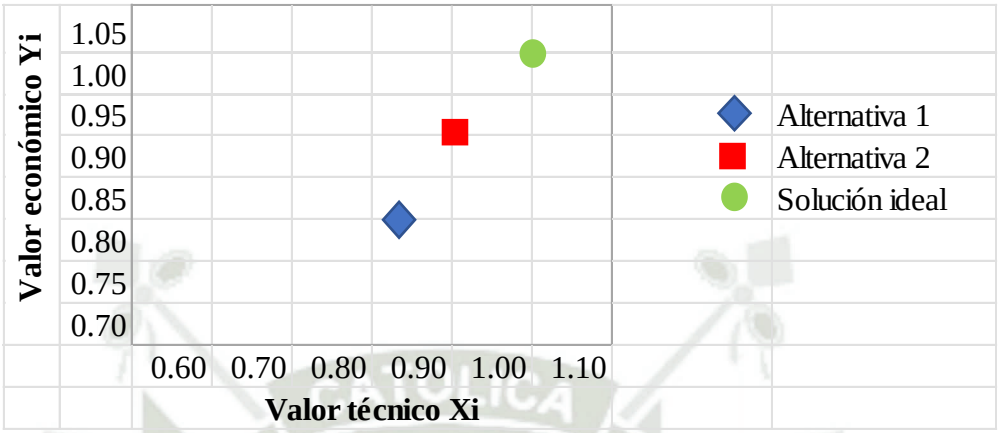


Figura 3.1 Valoración técnico-económica

3.2 Discusión de los Resultados

En la carga convencional de agua para un ciclo completo de lavado que regularmente está constituido por una fase de lavado con detergente, seguida de dos a tres subsecuentes fases de enjuague, se emplea, tomando en cuenta la capacidad de una lavadora doméstica de 19 Kg., 90 litros por etapa. Esto es, entre 270 a 360 litros por carga completa conforme se visualiza en la Tabla 3.3. El volumen total de consumo de agua potable para usos no potables resulta contraproducente dado el creciente estrés hídrico en países como el nuestro.

Tabla 3.3 Consumo de agua potable (litros) en función de los ciclos del lavado

Capacidad de lavadora en kg	Volumen de agua potable para el ciclo de lavado (lt)	Lavado + 1 enjuague (lt)	Lavado + 2 enjuague (lt)	Lavado + 3 enjuague (lt)
7	62	124	186	248
17-19	90	180	270	360

El cálculo del volumen de agua potable empleada para lavado en máquina se obtiene proyectando el volumen total de agua empleada por ciclo completo de lavado proyectándolo al consumo de agua por semana, por mes y extrapolándolo al año, tal como se observa en la

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 3.4. El volumen resultante es muy alto considerando la escasez de agua dulce que debe ser tratada para ser potabilizada y disponerse para usos como el lavado de ropa. El impacto ambiental es alto tanto por la demanda de agua y energía para potabilizarla, como por el volumen de efluentes que contaminan cuerpos de agua.

Tabla 3.4 Consumo de agua potable (litros) en función de la frecuencia de lavado completo de una lavadora

Capacidad de lavadora en kg	Lavado y ciclos de enjuague				Frecuencia de lavado por semana				Mes	Año
	Volumen de agua potable para ciclo de lavado (lt)	Lavado + 1 enjuague (lt)	Lavado + 2 enjuague (lt)	Lavado + 3 enjuague (lt)	1	2	3	4	1	1
7	62	124	186	248	248	496	744	992	3968	47616
17-19	90	180	270	360	360	720	1080	1440	5760	69120

El cálculo del volumen de aguas grises con potencial de reuso se obtiene proyectando el volumen de efluentes por semana, por mes y extrapolándolo al año. Los antecedentes de uso de aguas grises provenientes de máquinas de lavado señalan que solo debe considerarse el agua de los ciclos de enjuague. En perspectiva, con la implementación del sistema hidráulico propuesto, es importante el volumen de aguas grises que tiene potencial de reutilización como se observa en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Volumen de ahorro de agua potable (litros) por reutilización de agua gris

Capacidad de lavadora en kg	Frecuencia de lavado semanal			Mes	Año
	1	2	4	1	1
7	0	62	124	496	5952
17-19	0	90	180	720	8640

La propuesta original del estudio consideraba el reuso completo del volumen total de cada ciclo de lavado, es decir, los efluentes totales de la carga de agua con detergente sumado al volumen de agua de los ciclos de enjuague. En esa perspectiva resultó útil estimar el volumen de detergente usado en cada ciclo de lavado, partiendo del cálculo

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

semanal/mensual, proyectándolo al año. Esta cuantificación permite estimar el impacto económico de reutilizar el agua con ese insumo (detergente) lo que, en un cálculo simple, en términos económicos, resulta más relevante en costo mismo del agua. Es decir, si proyectamos cuánto se ahorra por darle un segundo uso al agua con detergente (costo del volumen de agua versus costo del detergente), el detergente supera en valor al costo por volumen de agua. Ver tabla. 3.6.

Tabla 3.6 Volumen de ahorro de detergente (gramos) por reutilización de agua gris

Capacidad de lavadora en kg	Volumen de detergente en polvo por frecuencia de lavado semanal (gr)			Mes	Año
	1	2	4	1	1
7	140	140	280	1120	13440
17-19	300	300	600	2400	28800

Tabla 3.7 Cantidad de lavadoras vendidas por período por regiones del Perú

Ciudad	Cantidad/mes regular	Cantidad mes de campaña	Proyección anual
Amazonas	62	81	782
Ancash	932	1211	11742
Apurimac	102	132	1284
Arequipa	1566	2036	19732
Ayacucho	152	198	1916
Cajamarca	681	886	8582
Cuzco	758	986	9552
Huancavelica	11	14	138
Huánuco	457	591	5752
Ica	1208	1571	15222
Junín	970	1261	12222
La Libertad	2416	3141	30442
Lambayeque	1478	1921	18622
Lima y Callao	10329	13427	130144
Loreto	561	730	7070
Madre de Dios	145	188	1826
Moquegua	225	293	2836
Pasco	32	42	404
Piura	1364	1773	17186
Puno	833	1083	10496
San Martín	662	861	8342
Tacna	108	141	1362
Tumbes	273	354	3438
Ucayali	481	626	6062
		Total Nacional	**325154**

Fuente: GFK Growth from Knowledge

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

El estimado siguiente (Tabla 3.7) corresponde al número de lavadoras vendidas por período de tiempo mensual en periodos regulares y las que corresponden a las ventas mensuales por campaña, que en nuestro país corresponden al Día de la Madre y Navidad, permite extrapolar la venta de equipos en cada departamento por año. La proyección que resulta del número de lavadoras vendidas resulta crucial porque permite proyectar el volumen de agua potable que puede reutilizarse, importante en una región como la nuestra.

Dado el ámbito geográfico en el cual se circunscribe el estudio, se estima el volumen de agua proveniente de efluentes del uso de lavadoras domésticas, potencialmente reutilizables en Arequipa (departamento). El resultado es revelador, por cuanto es un volumen muy importante, toda vez que vamos enfrentando un creciente estrés hídrico. Iniciativas como las derivadas del presente estudio cobrarán creciente relevancia. De otra parte, el volumen de detergente para un segundo uso alcanza igualmente un volumen importante, el que cuantificado resulta en un cuantioso ahorro tanto económico (costo del detergente) como de la disminución del impacto ambiental, por la menor disposición de contaminantes al alcantarillado. Ver Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Consumo de agua potable en función de la cantidad de lavadoras compradas en Arequipa

Capacidad de lavadora en Kg	Cantidad de lavadoras compradas / mes	Cantidad de lavadoras compradas / año	Ahorro potencial reutilizando el agua gris/mes	Ahorro potencial reutilizando el agua gris/año	Ahorro potencial de detergente /mes	Ahorro potencial de detergente /año	Ahorro potencial reutilizando el agua del ciclo completo/mes	Ahorro potencial reutilizando el del ciclo completo/año
17-19	1566	19732	1127520	170484480	3758400	568281600	9020160	1363875840
			m^3	m^3	TM	TM	m^3	m^3
			1127.52	170484.48	3758.4	568281.6	9020.16	1363875.84

Al extrapolar el volumen de ahorro de detergente y de agua por país, se tienen resultados reveladores por el impacto que suponen, ahorro de agua potable, lo que debe considerarse como parte de la política ambiental, acciones de gobierno para garantizar el cumplimiento del ODS 6, Garantizar el acceso al agua y su gestión sostenible. Ver Tabla 3.9.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 3.9 Consumo de agua potable en función de la cantidad de lavadoras compradas en el Perú

Capacidad de lavadora en Kg	Cantidad de lavadoras compradas / mes	Cantidad de lavadoras compradas / año	Ahorro potencial reutilizando el agua de completo de lavado /mes	Ahorro potencial reutilizando el agua de completo de lavado /año	Ahorro potencial de detergente /mes	Ahorro potencial de detergente /año	Ahorro potencial reutilizando el agua del ciclo completo/mes	Ahorro potencial reutilizando el del ciclo completo/año
17-19	25976	325154	18702720	2809330560	62342400	9364435200	149621760	22474644480
			m^3	m^3	TM	TM	m^3	m^3
			18702.72	2809330.56	62342.4	9364435.2	149621.76	22474644.48

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

CONCLUSIONES

- El diseño de un prototipo funcional para la reutilización de aguas grises efluentes de máquinas de lavado, así como el establecimiento de las características técnicas del sistema para su construcción se lograron aplicando la metodología planteada por la norma alemana VDI 2221 que involucra, las especificaciones, estructura de funciones, matriz morfológica, conceptos de solución, diseño de componentes y construcción del prototipo. El prototipo se construyó y fue sometido a pruebas durante más de 18 meses y sigue en funcionamiento con mantenimiento periódico.

- El volumen de aguas grises reutilizables a partir de los efluentes de máquinas de lavado; considerando que cada ciclo completo está constituido por una etapa de lavado y dos, hasta tres ciclos de enjuague; alcanza 2/3 del volumen total, lo cual resulta altamente relevante, por el segundo uso que puede darse a las aguas grises, que de manera habitual se disponen directamente al alcantarillado.

- La construcción del prototipo funcional fue técnicamente viable porque está constituido por un tablero de control y un sistema hidráulico de construcción doméstica que solo requiere conocimientos de gasfitería convencional.

- El diseño e implementación de un sistema hidráulico para la reutilización de aguas grises efluentes de máquinas de lavado resulta técnica y económicamente viable y su impacto se prevé como muy alto para enfrentar el creciente estrés hídrico que afecta especialmente a nuestra región, que se ubica en la cabecera del desierto más seco del planeta, Atacama.

- Los resultados obtenidos nos han permitido responder a las preguntas de investigación, cumplir los objetivos del estudio y por los hallazgos se concluye en que la hipótesis fue probada.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

RECOMENDACIONES

La experiencia de realizar una propuesta partiendo desde la idea hasta la construcción de un prototipo funcional ha provisto muchos aprendizajes, dando pie a recomendaciones como las que siguen.

Primera.- Debe incorporarse filtros tanto para el ingreso de los efluentes al tanque intermedio, como a la salida del mismo, antes del bombeo hacia el tinaco Rotoplas a 3 metros de altura.

Segunda.- Rediseñar los filtros señalados, probando nuevos materiales y circuitos de filtrado, para proveer un primer tratamiento físico y evitar el transporte de micro plásticos, fibras de tejidos, cabellos y partículas de tierra hacia el depósito de almacenamiento

Tercero.- Rediseñar las instalaciones para la succión de las aguas grises por la bomba toda vez que es frecuente que el sistema entre en cavitación.

Cuarto.- A efecto de hacer el sistema, completamente autónomo respecto del consumo de energía, se debe plantear el abastecimiento de energía a partir de la incorporación de paneles fotovoltaicos y un acumulador.

Quinto.- Diseñar un sistema de bajo costo para el procesamiento químico y biológico para restaurar las propiedades de las aguas grises del primer ciclo, agua con detergente a fin de que el volumen de reutilización de aguas grises alcance el 100% del ciclo de lavado (lavado + enjuagues), con el consiguiente ahorro de volumen de agua y detergente.

Sexto.- Incorporar una bomba periférica para incrementar la presión necesaria para vencer la resistencia de las electroválvulas al momento de retornar las aguas grises a la admisión de la lavadora o para su disposición a surtir agua para los inodoros.

Séptimo.- Rediseñar y construir un panel de control para sustituir el que posee originalmente la lavadora, para incorporar controles y funcionalidades, para realizar un ciclo de lavado convencional y que permita el reúso de los efluentes.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Octavo.- Recomendar a nivel institucional a los fabricantes de lavadoras para que realicen el rediseño industrial de sus productos incorporando la solución planteada, es decir, implementando una funcionalidad de ciclo de reutilización de aguas grises en sus equipos.

Noveno.- Recomendar al Colegio de Ingenieros del Perú que la norma técnica de construcción de edificaciones, en específico la norma IS.010 (Instalaciones Sanitarias para Edificaciones) incorporen un segundo circuito de abastecimiento de agua, surtida por las aguas grises, para descarga en inodoros.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

REFERENCIAS

Abedin, S. B. y Rakib, Z. B. (2013). Generation and Quality Analysis of Greywater at Dhaka City. *Environmental Research, Engineering and Management*, *64*(2). https://doi.org/10.5755/j01.erem.64.2.3992

Alcalde, S. (2022, 18 de noviembre). La población mundial crece mucho menos de lo previsto. *National Geographic*. https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/poblacion-mundial-crece-mucho-menos-previsto_19098

Caracela, C., Álvarez, R., Yapo, R. y Conza, J. (2021). Diseño e Implementación de un Sistema Recolector de Aguas Grises. EPIMMEM UCSM

Casanova, L. M., Gerba, C. P. y Karpiscak, M. (2001). Chemical and microbial characterization of household graywater. *Journal of Environmental Science and Health. Part A, Toxic/hazardous Substances & Environmental Engineering*, *36*(4), 395–401. https://doi.org/10.1081/ese-100103471

Das, R., Ali, M. E., Hamid, S. B. A., Ramakrishna, S. y Chowdhury, Z. Z. (2014). Carbon nanotube membranes for water purification: A bright future in water desalination. *Desalination*, *336*, 97–109. https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.12.026

Escudero, D.J. y Heredia, M.J. (2019). Propuesta de Utilización de un Sistema de Reciclaje de Aguas Grises en el Edificio Santa Beatriz Bloque II: [Tesis para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad Ricardo Palma, Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Civil]. http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2646

FAO, Water: source of food security - 2002 World Food Day. (2021, 8 de febrero). https://www.fao.org/3/ac807e/ac807e01.htm

Florez, B.R. y Granados, O.A. Elaboración de un Sistema para la Reutilización del Agua Residual de la Lavadora, Adaptable al Proceso Constructivo de una Batería de Lavado: [Proyecto de Grado presentado para optar el título de Tecnólogo en Construcciones Arquitectónicas Universidad La Gran Colombia, Tecnología en Construcciones Arquitectónicas]. http://hdl.handle.net/11396/3984

Gore, A. (2006). *An inconvenient truth: The planetary emergency of global warming and what we can do about it*. Rodale Press. https://books.google.com.pe/books?id=93M6C24ac9MC

Hanjra, M. A. y Qureshi, M. E. (2010). Global water crisis and future food security in an era of climate change. *Food Policy*, *35*(5), 365–377. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.05.006

Hernández Leal, L., Temmink, H., Zeeman, G. y Buisman, C. J. N. (2010). Comparison of Three Systems for Biological Greywater Treatment. Water, 2(2), 155–169. https://doi.org/10.3390/w2020155

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. (2010) Dirección de Desarrollo Tecnológico. https://www.aya.go.cr/

Jamrah, A., Al-Futaisi, A., Prathapar, S. y Harrasi, A. A. (2008). Evaluating greywater reuse potential for sustainable water resources management in Oman. Environmental Monitoring and Assessment, 137(1-3), 315–327. https://doi.org/10.1007/s10661-007-9767-2

Juan, Y.K., Chen, Y. y Lin, J.M. (2016). Greywater Reuse System Design and Economic Analysis for Residential Buildings in Taiwan. Water, 8(11), 546. https://doi.org/10.3390/w8110546

Kumar, S., Talan, A., Boyle, K., Ormeci, B., Drogui, P. y Tyagi, R. D [Rajeshwar Dayal]. (2021). Water Recycling: Economic and Environmental Benefits. En A. Pandey, R. D. Tyagi y S. J. Varjani (Eds.), Biomass, biofuels, biochemicals. Circular bioeconomy-- current developments and future outlook (pp. 91–120). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821878-5.00015-5

Leong, J. Y. C., Oh, K. S., Poh, P. E. y Chong, M. N. (2017). Prospects of hybrid rainwater-greywater decentralised system for water recycling and reuse: A review. Journal of Cleaner Production, 142, 3014–3027. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.167

Liu, S., Butler, D., Memon, F. A., Makropoulos, C., Avery, L. y Jefferson, B. (2010). Impacts of residence time during storage on potential of water saving for grey water recycling system. *Water Research, 44*(1), 267–277. https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.09.023

Llanos, G. (2012). Propuesta de Instalación Hidráulica Sanitaria para la reutilización de Aguas Grises y Aprovechamiento de Agua Pluvial en Unidades Habitacionales Ubicadas en la Ciudad de México: [Tesis para obtener el Grado de Maestro en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería]. http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/5252?show=full

López Ramos, D. (2022). "Análisis de la Sostenibilidad del Recurso Hídrico en la Subcuenca del Río Chili mediante la Aplicación del Índice de Sostenibilidad de Cuencas (ISC)": [Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales, Escuela de Postgrado de la Universidad Católica de Santa María. Perú]. Repositorio Institucional UCSM. https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/12200

Mainali, B., Ngo, H. H [Huu Hao], Guo, W., Pham, T. T. N. y Johnston, A. (2011). Feasibility assessment of recycled water use for washing machines in Australia through SWOT analysis. Resources, Conservation and Recycling, 56(1), 87–91. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.007

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos

En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Manouchehri, M. y Kargari, A. (2017). Water recovery from laundry wastewater by the cross flow microfiltration process: A strategy for water recycling in residential buildings. Journal of Cleaner Production, 168, 227–238. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.211

National Centers for Environmental Information. (2020). *ETOPO Global Relief Model*. https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (2014). Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales. ww.oefa.gob.pe

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultur, F. A.O. (2015). Perfil de País – Perú. https://www.fao.org/3/ca0447es/CA0447ES.pdf

Ortega, M. I. (2016). Sistema alternativo para reutilizar aguas grises en una vivienda de la ciudad de Machala: [Trabajo de Titulación para obtención del Grado de Magister en Impactos Ambientales Universidad de Guayaquil Facultad de Arquitectura y Urbanismo Maestría en Impactos Ambientales]. http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/15193

Pham, T. T. N., Ngo, H. H., Guo, W., Dang, H. P. D., Mainali, B., Johnston, A. y Listowski, A. (2011). Responses of community to the possible use of recycled water for washing machines: A case study in Sydney, Australia. *Resources, Conservation and Recycling*, *55*(5), 535–540. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.01.004

Piani, L., Marrocchi, Y., Rigaudier, T., Vacher, L. G., Thomassin, D. y Marty, B. (2020). Earth's water may have been inherited from material similar to enstatite chondrite meteorites. *Science (New York, N.Y.)*, *369*(6507), 1110–1113. https://doi.org/10.1126/science.aba1948

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2023, 25 de noviembre). Resultados. PNUD. https://www.undp.org/es/resultados

Radcliffe, J. C. y Page, D. (2020). Water reuse and recycling in Australia — history, current situation and future perspectives. *Water Cycle*, *1*, 19–40. https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.05.005

Reang, S. y Nath, H. (2021). Grey water treatment with spiral wound UF and RO membranes. *Materials Today: Proceedings*, *46*, 6253–6259. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.781

Riba Romeba, C. (2002). Diseño Concurrente. CPET (Centre de Publicacions del Campus Nord) Politext Edicions UPC. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36754/9788498800746.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos

En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Rodríguez, H. (2020, 31 de agosto). Nuevas pistas sobre el origen del agua de la Tierra. *National Geographic*. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/nuevas-pistas-sobre-origen-agua-tierra_15853

Ruiz, M. A. (2019). Sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises aplicables a sectores urbanos con déficit hídrico: [Trabajo para optar el título de Ingeniero de Ejecución en Mecánica de Procesos y Mantenimiento Industrial, Universidad Técnica Federico Santa María, Sede Concepción - Rey Balduino de Bélgica]. https://hdl.handle.net/11673/48671

Sarkar, D. (2023). Life cycle costing analysis of grey water recycling systems for commercial and residential projects of Ahmedabad, India. *Materials Today: Proceedings*, *77*, 254–259. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.298

SENAMHI - Perú. (2019). Fenómeno El Niño. https://www.senamhi.gob.pe/?p=fenomeno-el-nino

Silva, F. (2021). Diseño de Sistema de Recuperación y Reutilización de Aguas Grises para Viviendas Sociales: [Trabajo de Titulación para optar al Título de Ingeniero en Fabricación y Diseño Industrial, Universidad Técnica Federico Santa María, Sede Viña del Mar - José Miguel Carrera]. https://hdl.handle.net/11673/50235

Stec, A. y Kordana, S. (2015). Analysis of profitability of rainwater harvesting, gray water recycling and drain water heat recovery systems. *Resources, Conservation and Recycling*, *105*, 84–94. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.006

Steven, C. (2014). Technical Guides for Greywater Recycling System (V2-1 Sep 2014) (2). https://smartnet.niua.org/sites/default/files/resources/greywatertech.pdf

Tian, Y., Wu, H., Zhang, G., Wang, L., Zheng, D. y Li, S. (2020). Perceptions of ecosystem services, disservices and willingness-to-pay for urban green space conservation. *Journal of Environmental Management*, *260*, 110140. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110140

Vigneswaran, M. S. (2004). Recycle and Reuse of Domestic Wastewater. https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=0081c5d9eaec62bb1a69585ec314f0f94f7f7dc7

Wanjiru, E. y Xia, X. (2018). Sustainable energy-water management for residential houses with optimal integrated grey and rainwater recycling. *Journal of Cleaner Production*, *170*, 1151–1166. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.212

Zanni, S., Cipolla, S. S., Di Fusco, E., Lenci, A., Altobelli, M., Currado, A., Maglionico, M. y Bonoli, A. (2019). Modeling for sustainability: Life cycle assessment application to evaluate environmental performance of water recycling solutions at the dwelling level. Sustainable Production and Consumption, 17, 47–61. https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.09.002

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis