

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

"Diseño de un sistema de riego de aguas tratadas"

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Frank Erick De la O Sánchez

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2018

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado a Dios, quien en su inmensa sabiduría supo guiarme por el camino del bien y traerme hasta los últimos escalones de mi carrera universitaria.

A mi abnegada madre, cuyo sacrificio recordaré por siempre.

Y a María Belén Galarza Farro por atarme al mundo y haberme hecho mejor persona.

Frank Erick De la O Sánchez.

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a mi pareja pues supo alentarme y apoyarme cuando más lo necesité.

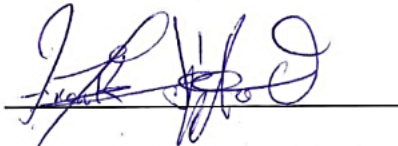
A los amigos que encontré en el camino y que no se fueron nunca.

A todos los profesores de la carrera que supieron orientarme de la mejor manera posible.

Frank Erick De la O Sánchez.

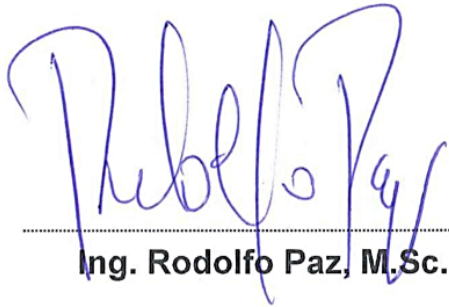
DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponden conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Yo, *Frank Erick De la O Sánchez* doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Frank Erick De la O Sánchez', is written over a horizontal line.

Frank Erick De la O Sánchez

EVALUADORES



Handwritten signature of Rodolfo Paz in blue ink, consisting of stylized cursive letters.

Ing. Rodolfo Paz, M.Sc.

PROFESOR DE LA MATERIA



Handwritten signature of Gonzalo Zabala in blue ink, featuring a large, sweeping oval flourish.

Ing. Gonzalo Zabala, M.Sc.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Este proyecto se basa en el aprovechamiento de los efluentes producidos por la planta de tratamiento de aguas residuales del núcleo de ingenierías en el campus Gustavo Galindo de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, mediante el diseño de un sistema de riego para la cancha de fútbol del complejo deportivo cercano. El proceso de diseño contempló una metodología de selección de soluciones, evaluando criterios físicos, económicos y medioambientales. Se consideraron las características físicas y condiciones de trabajo existentes, mediante lo cual se obtuvo una red de riego y distribución; la misma que incluyó el uso de 269 m de tubería existente, permitiendo satisfacer las necesidades de irrigación de la cancha de fútbol, estimadas en 57.5 m³ por cada jornada de trabajo. Se concluye que el sistema de riego actual presenta ineficiencias, pues no permite realizar un gasto controlado del agua tratada debido a problemas de sobredimensionamiento. Además, el uso de agua tratada mediante la red de riego propuesta genera costos inferiores respecto de aquellos generados por la utilización de agua potable. Se estima un monto de implementación de proyecto de USD \$4,236.69, recuperándose la inversión en 2 años; contribuyendo además al cumplimiento del sexto Objetivo de Desarrollo Sostenible planteado por la Organización de las Naciones Unidas; más específicamente al subobjetivo cuatro, donde se plantea el aumento considerable del uso eficiente de recursos hídricos; asegurando la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce, para reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua.

Palabras Clave: Aguas residuales, Sistema de riego.

ABSTRACT

This project is based on the use of effluents produced by the wastewater treatment plant of the engineering nucleus in the Gustavo Galindo campus of the Polytechnic School of the Litoral, by designing an irrigation system for the soccer field of the Sports complex nearby. The design process contemplated a methodology for the selection of solutions, evaluating physical, economic and environmental criteria. The existing physical characteristics and working conditions were considered, through which an irrigation and distribution network was obtained; the same that included the use of 269 m of existing pipeline, allowing to satisfy the irrigation needs of the soccer field, estimated at 57.5 m³ for each working day. It is concluded that the current irrigation system has inefficiencies, since it does not allow a controlled expenditure of the treated water due to problems of oversizing. In addition, the use of treated water through the proposed irrigation network generates lower costs than those generated by the use of potable water. A project implementation amount of USD \$ 4,236.69 is estimated, recovering the investment in 2 years; also contributing to the fulfillment of the sixth Sustainable Development Goal proposed by the United Nations Organization; more specifically to sub-goal four, where the considerable increase in the efficient use of water resources is considered; ensuring the sustainability of the extraction and supply of fresh water, to reduce considerably the number of people suffering from lack of water.

Keywords: Wastewater, irrigation system.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Justificación del proyecto.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Marco teórico.	3
1.4.1 Aguas negras residuales	3
1.4.2 Tratamiento de aguas negras residuales	3
1.4.3 Sobre el uso de aguas residuales para actividades de riego	4
1.4.4 Requerimientos de riego promedio para la sección costa del Ecuador. ...	6
1.4.5 Dimensionamiento de sistemas de riego.....	6
1.4.6 Flujo de agua en tuberías.....	6
1.4.7 Propiedades físicas de los fluidos	7
1.4.8 Ecuación de continuidad	7
1.4.9 Ecuación de Bernoulli.....	7
1.4.10 Pérdidas de carga	8
1.4.11 Potencia hidráulica requerida	9
1.4.12 Cavitación.....	9
1.4.13 Bombas y su uso de acuerdo con el líquido a bombear.	10
1.4.14 Reglas de Semejanza para bombas	10
1.4.15 Parámetros de variación de velocidad para un motor eléctrico.....	11
1.4.16 Cálculo de pérdida de carga para sistemas cerrados de riego.....	11

CAPÍTULO 2	12
2. Metodología	12
2.1 Metodología de diseño de Posibles Soluciones.....	12
2.1.1 Necesidades y requerimientos de diseño.....	12
2.1.2 Árbol de Objetivos y restricciones	13
2.1.3 Caja negra del sistema.....	14
2.1.4 Tabla de comparación por pares.....	15
2.1.5 Tabla morfológica.....	16
2.1.6 Caja Transparente para el proceso de Distribución de agua.....	17
2.1.7 Matrices de decisión.....	17
2.2 Diseño del proceso de distribución del agua negra tratada	21
2.2.1 Análisis de dureza del agua.	21
2.2.2 Análisis Ambiental	22
2.2.3 Evaluación de capacidades requeridas y disponibles.	22
2.2.4 Análisis económico.....	22
CAPÍTULO 3	23
3. Resultados Y ANÁLISIS	23
3.1 Resultados de la selección de diseño.....	23
3.2 Desarrollo de la solución de Diseño.....	23
3.3 Análisis Ambiental.....	24
3.3.1 Análisis de dureza del agua	25
3.4 Resultados de dimensionamiento de tuberías.	25
3.5 Resultados de dimensionamiento de potencia de bombeo.....	26
3.6 Selección de la bomba centrífuga	27
3.7 Selección de componentes especializados.	27
3.8 Determinación de frecuencias de trabajo en función del caudal requerido. ...	28
3.9 Determinación de las secuencias de accionamiento	28
3.10 Análisis de costos	29
CAPÍTULO 4	31
4. Conclusiones Y RECOMENDACIONES.....	31
4.1 Conclusiones	31
4.2 Recomendaciones	32

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
MBR	Biorreactor de membrana
NPSH	Cabezal Neto de Succión Positiva
NPSHd	Cabezal Neto de Succión Positiva disponible
NPSHr	Cabezal Neto de Succión Positiva requerido
PE BD	Polietileno de baja densidad
PVC	Policloruro de vinilo
TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente
UV	Ultravioleta

SIMBOLOGÍA

T	Temperatura
M	Masa
V	Volumen
Γ	Viscosidad dinámica
ρ	Densidad
D	Diámetro de tubería
v	Velocidad media
A	Área de sección transversal
Q	Caudal
Ph	Potencial hidrógeno
P	Presión
A	Factores de Corrección Cinética
Z	Altura de elevación sobre el plano de referencia
H _L	Pérdida de carga por fricción y accesorios
H _B	Cabezal de carga suministrado por Bomba, m.
h	Horas
in	Pulgadas
m	Metro
m ²	Metro cuadrado
m ³	Metro cúbico
min	Minutos
μ	Viscosidad dinámica
Re	Número de Reynolds
Mg	Miligramo
l	Litro
ml	Mililitro
f	Factor de fricción de Darcy
P _H	Potencia hidráulica
η	Eficiencia
Hz	Hertz
HP	Caballos de fuerza

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Criterios de calidad de aguas para uso agrícola en riego.....	4
Figura 1.2 Parámetros de los niveles de calidad de agua para riego.	5
Figura 2.1 Metodología de diseño de soluciones	12
Figura 2.2 Árbol de Objetivos y restricciones para el diseño del sistema de distribución de aguas negras para riego.	14
Figura 2.3. Caja negra para el diseño del sistema de distribución de aguas negras para riego.....	15
Figura 2.4. Caja transparente para el diseño del sistema de distribución de aguas negras para riego.....	17

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Propiedades utilizadas en el cálculo de flujo en tuberías.	7
Tabla 2.1 Información física de la instalación actual de la planta.	13
Tabla 2.2. Cuadro de Comparación por pares para el diseño del sistema de distribución de aguas negras para riego.	15
Tabla 2.3. Tabla morfológica para el diseño del sistema de riego de aguas tratadas. ..	16
Tabla 2.4 Matriz de selección Preliminar	18
Tabla 2.5 Comparación por pares para criterios de la etapa segunda de selección	19
Tabla 2.6 Calificaciones de las dos opciones de diseño disponibles en función de los criterios de selección.	20
Tabla 2.7 Matriz de decisión	21
Tabla 3.1. Resultados de análisis fisicoquímico realizado a la planta de tratamiento de aguas residuales de ingeniería en agosto del 2018.....	24
Tabla 3.2. Resumen de selección de tuberías para el sistema diseñado.....	25
Tabla 3.3. Parámetros de diseño obtenidos para la selección del sistema de bombeo.	26
Tabla 3.4. Información de bomba seleccionada.	27
Tabla 3.5. Resumen de costos para la implementación del sistema propuesto.	29

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El uso de aguas residuales tratadas en el riego de zonas verdes y cultivos es una de las actividades que se realizan en la actualidad a modo de aprovechar los recursos hídricos disponibles. A lo largo de todo el mundo las operaciones de riego y agricultura utilizan alrededor del 70% del total de agua dulce existente, por lo cual se han desarrollado procesos tecnológicos que permiten el aprovechamiento efectivo del agua, una vez que ésta ha recibido su primer uso al convertirse en aguas negras o aguas residuales; permitiendo la reutilización de éstas en labores de riego. Para ello se emplean plantas de tratamiento, las cuales mediante el uso de procesos fisicoquímicos, permiten controlar los niveles de carga bacteriana y sólidos disueltos en las aguas negras; transformándolas en un afluente desde el cual se puede obtener la humedad y nutrientes necesarios para abastecer las demandas de riego de áreas verdes o campos agrícolas.

1.1 Descripción del problema

Dentro del Campus Gustavo Galindo, de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, existe una planta que se encarga de dar tratamiento a las aguas negras provenientes del núcleo de ingenierías; donde sus efluentes generados son destinados para aplicaciones de riego sobre la cancha de fútbol reglamentaria que se encuentra en el complejo deportivo cercano. Sin embargo, actualmente dichas aguas tratadas no están siendo utilizadas para dicho fin.

El desuso de este recurso hídrico se debe a que el sistema de riego existente carece de la dosificación necesaria para mantener el riego continuo. Se suma a esto el temor de algunos trabajadores, quienes creen que puede llegar a existir alguna complicación en su salud debido al contacto directo que ellos mantienen con estas aguas.

Las dos condiciones antes mencionadas han originado que no se haga uso del agua tratada y que en su lugar se utilice agua potable para realizar las actividades de riego. Esto implica un mayor consumo de agua para la institución y mayor nivel

de gasto, tanto por el uso de agua potable como por el desperdicio de aguas tratadas debido a que el tratamiento de aguas residuales debe realizarse a diario, independientemente de su uso.

1.2 Justificación del proyecto

La planta de tratamiento de aguas residuales de ingeniería tiene una capacidad de proceso de efluentes que varía entre 8.40 y 15 m³/h. El costo de tratamiento de aguas negras se estima en \$0.85 por cada metro cubico de efluente tratado, lo cual resulta más barato que el costo de agua potable que paga la institución, estimado en \$1.13 por metro cubico (ver Apéndice D). Esta tarifa se calcula en base al alto consumo de agua que realiza todo el campus y a los subsidios que percibe esta locación gracias a su calidad de institución pública. (ESPOL, 2019). El tratamiento de aguas negras genera un costo de alrededor de \$ 2,040.00 al mes, calculado en base a un caudal de 15 m³/h durante 20 días laborables para jornadas de 8 horas. El costo generado por tratar agua residual estará siempre presente, pues el tratamiento de aguas residuales debe realizarse de manera constante; independientemente de que se utilice este efluente en aplicaciones de riego o se viertan en el lago. (Orcés Hilbron, García Gallardo, & Tobalina Dito, 2005).

El sistema actual de distribución y riego se compone de un reservorio destinado para almacenar el agua que ya pasó por el tratamiento, y un grupo de bombeo-distribución encargado de conducir el agua hacia su lugar final de utilización. Este último no permite realizar un uso eficiente del agua almacenada debido a fallas en el dimensionamiento del sistema, ocasionando a su vez el vaciado total del tanque reservorio en ciertas ocasiones, lo cual puede ocasionar daños irreparables en los equipos instalados.

Con base en lo mencionado, se busca diseñar un sistema de distribución estable que permita la reutilización del agua negra proveniente del tratamiento, aprovechando este recurso hídrico y evitando el consumo innecesario de agua potable para las actividades de riego; utilizando además parte o la totalidad de la infraestructura existente en la instalación, para de este modo generar un ahorro económico para la institución.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de riego para abastecer la demanda de irrigación de 5750 m², correspondientes a la cancha de fútbol reglamentaria del complejo deportivo de ingenierías, utilizando el agua procesada por la planta de tratamiento de aguas negras que se encuentra ubicada próxima al complejo deportivo.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Realizar el diagnóstico inicial del sistema.
2. Diseñar y dimensionar el sistema de distribución para la capacidad de riego requerida.
3. Seleccionar los elementos y equipos necesarios para el sistema de distribución y riego.

1.4 Marco teórico.

1.4.1 Aguas negras residuales

Las aguas negras residuales son aquellas cuya composición variada proviene de su uso en el hogar, la industria, el comercio y el sector agrícola; y que, por algún motivo, hayan sufrido pérdidas en su calidad original. (Ministerio del Ambiente, 2015)

1.4.2 Tratamiento de aguas negras residuales

El tratamiento de aguas residuales se conforma en su modo más general de las siguientes etapas:

Tratamiento preliminar: Se realiza la remoción de partículas gruesas y se realiza la compensación y ajustes de pH.

Tratamiento primario: Se aplican procesos físicos como sedimentación o decantación para la reducción de sólidos sedimentables y flotantes presentes.

Tratamiento secundario: Se emplean procesos biológicos y/o químicos para reducir compuestos orgánicos biodegradables, y sólidos suspendidos

Tratamiento avanzado: Son procesos necesarios para la remoción de exceso de nutrientes y sustancias remanentes de los procesos anteriores.

1.4.3 Sobre el uso de aguas residuales para actividades de riego

El Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), publicada el Registro oficial 387 – AM 140, en su inciso 5.1.3 establece los valores de calidad que debe poseer un cuerpo de aguas negras tratadas para ser utilizado en actividades de riego.

PARÁMETRO	EXPRESADO COMO	UNIDAD	CRITERIO DE CALIDAD
Aluminio	Al	mg/l	5
Arsénico	As	mg/l	0,1
Berilio	Be	mg/l	0,1
Boro	B	mg/l	0,75
Cadmio	Cd	mg/l	0,05
Cinc	Zn	mg/l	2
Cobalto	Co	mg/l	0,01
Cobre	Cu	mg/l	0,2
Cromo	Cr ⁺⁶	mg/l	0,1
Flúor	F	mg/l	1
Hierro	Fe	mg/l	5
Litio	Li	mg/l	2,5
Mercurio	Hg	mg/l	0,001
Manganeso	Mn	mg/l	0,2
Molibdeno	Mo	mg/l	0,01
Níquel	Ni	mg/l	0,2
pH	pH		6-sep
Plomo	Pb	mg/l	5
Selenio	Se	mg/l	0,02
Vanadio	V	mg/l	0,1
Coliformes fecales	NMP	NMP/100ml	1000
Huevos de parásitos			Ausencia
Aceites y grasas	Película Visible		Ausencia
Materia flotante	Visible		Ausencia

Figura 1.1 Criterios de calidad de aguas para uso agrícola en riego.

(Ministerio del Ambiente, 2015)

Además de la figura (1.1), la normativa hace mención del uso de la figura (1.2) para la interpretación que se debe dar para los parámetros de agua a emplearse para riego:

PROBLEMA POTENCIAL	UNIDADES	GRADO DE RESTRICCIÓN *		
		Ninguno	Ligero-moderado	Severo
Salinidad: (1)				
CE (2)	milimhos/cm	0,7	0,7-3,0	>3,0
SDT (3)	mg/l	450	450-2000	>2000
Infiltración: (4)				
RAS=0-3yCE=		0,7	0,7-0,2	<0,2
RAS=3-6yCE=		1,2	1,2-0,3	<0,3
RAS=6-12yCE=		1,9	1,9-0,5	<0,5
RAS=12-20yCE=		2,9	2,9-1,3	<1,3
RAS=20-40YCE=		5	5,0-2,9	<2,9
Toxicidad por iones específicos (5)				
Sodio:				
Irrigación superficial RAS (6)	meq/l	3	3,0-9,0	>9
Aspersión	meq/l	3	3	
Cloruros:				
Irrigación superficial	meq/l	4	4,0-10,0	>10
Aspersión	meq/l	3	3	
Boro:	mg/l	0,7	0,7-3,0	>3
Efectos misceláneos (7)				
Nitrógeno (N-NO ₃ -)	mg/l	5	5,0-30,0	>30
Bicarbonato (HCO ₃ -) Solo				
aspersión	meq/l	1,5	1,5-8,5	>8,5
pH	Rango normal		6,5-8,4	
(1) Afecta a la disponibilidad de agua para los cultivos (2) CE = Conductividad eléctrica del agua de regadío (3) SDT = Sólidos disueltos totales (4) Afecta a la tasa de infiltración del agua en el suelo (5) Afecta a la sensibilidad de los cultivos (6) RAS, relación de absorción de sodio ajustada (7) Afecta a los cultivos susceptibles				
* Es el grado de limitación, que indica el rango de factibilidad para el uso del agua en riego.				

Figura 1.2 Parámetros de los niveles de calidad de agua para riego.

(Ministerio del Ambiente, 2015)

Cuando se estime conveniente el uso de aguas residuales en actividades de riego se debe comparar los valores de las figuras (1.1) y (1.2).

1.4.4 Requerimientos de riego promedio para la sección costa del Ecuador.

Se estima que se requiere de 25 a 35 milímetros de columna vertical de agua por metro cuadrado a la semana para mantener fuerte las raíces de una superficie con césped, evitando de ese modo el deslizamiento de este y el nacimiento de malezas. Adicionalmente, es necesario distribuir el riego entre 2 o 3 días de la semana laboral para evitar que se produzca saturación de agua en el terreno; resultando en la aplicación de 10 mm de agua por metro cuadrado a lo largo de toda una jornada de riego. (Bravo Mero, Mieles Moreira, Velasco Mero, & Vera Lara, 2008)

1.4.5 Dimensionamiento de sistemas de riego

Para la determinación de capacidades de un sistema de riego se presentan tres etapas básicas:

Determinación de líneas de conducción y distribución: comprende la selección de las tuberías de distribución, emisores de entrega o distributores, así como la selección de accesorios acoplados en la línea.

Dimensionamiento de bombeo: Comprende el dimensionamiento de la bomba en función de diámetros de salida de tubería caudales.

Determinación de controladores de régimen: Se determina así a cualquier instrumento encargado de censar o controlar el régimen de paso de un fluido a través de un sistema de distribución de líquido.

1.4.6 Flujo de agua en tuberías

El agua es un líquido incompresible que tiene la capacidad de fluir dentro de tuberías de rugosidad no despreciable. Sabiendo esto, se utilizan grupos de bombeo que proporcionan el empuje y energía necesarios para mover el caudal de líquido a través de las tuberías; venciendo a las fuerzas de fricción, inerciales y gravitacionales.

Para relacionar la cantidad de líquido que transita a través de la tubería se utiliza el concepto de caudal (ecuación (1.1)), el cual relaciona la velocidad media a través de la tubería y el área transversal de la misma: (White, 2008)

$$Q = v * A \quad (1.1)$$

1.4.7 Propiedades físicas de los fluidos

Todas las sustancias existentes tienen propiedades inherentes de su composición química. Los fluidos que transitan a través de las tuberías tienen fuerte dependencia de dichas propiedades, las cuales a su vez dependen de factores atmosféricos como la presión y la temperatura, tal como se observa en la Tabla (1.1). (White, 2008)

Tabla 1.1 Propiedades utilizadas en el cálculo de flujo en tuberías. (White, 2008)

Propiedad Física	Dependencia	Expresión matemática
Densidad	$\rho = f(T)$	$\rho = \frac{m}{V}$
Viscosidad Dinámica	$\mu = f(T)$	$\mu = \gamma^* \rho$
Número de Reynolds	$Re = f(v, D, \rho, \mu)$	$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$

Autor: De la O Frank

1.4.8 Ecuación de continuidad

El cumplimiento del principio de conservación de masa y flujo exige que entre dos secciones transversales ubicadas en serie para una misma tubería, el flujo volumétrico debe ser el mismo; siempre y cuando ambas secciones se encuentren a la misma temperatura, tal como se exhibe en la ecuación (1.2). (White, 2008)

$$Q_{1-2} = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (1.2)$$

1.4.9 Ecuación de Bernoulli

Es una ecuación que relaciona las formas de energía más elementales para un fluido incompresible, respecto de la energía mecánica del sistema; y se expresa

comúnmente en metros de columna de fluido para facilidad de interpretación. La ecuación tiene la siguiente forma:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_B = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_L \quad (1.3)$$

Para flujo laminar en tuberías el valor de α_1 , α_2 es 2.0 y para flujo turbulento conviene asumir estos valores iguales a la unidad. (White, 2008)

1.4.10 Pérdidas de carga

Como ya se evidencia de la ecuación (1.3) las pérdidas de carga son inherentes de un sistema de bombeo, pues éstas representan la energía mecánica que se transforma en energía térmica por efecto del rozamiento. La pérdida de carga para el caso de un flujo completamente desarrollado a través de un conducto de sección transversal constante, depende únicamente de las características del flujo; es decir, depende del número de Reynolds y de la rugosidad de la pared. Estas pérdidas de carga pueden ser de dos tipos: pérdida por fricción debido a la rugosidad de las paredes de la tubería (Ecuación (1.5)) o pérdida por accesorios (Ecuación (1.6)).

$$h_L = h_f + h_K \quad (1.4)$$

$$h_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{v^2}{2g} \quad (1.5)$$

$$h_K = K \frac{v^2}{2g} \quad (1.6)$$

El coeficiente f es conocido como factor de fricción de Darcy y representa la pérdida de carga por fricción. La forma de calcular este factor de fricción dependerá del tipo de régimen determinado por el número de Reynolds (Laminar o turbulento) y de la rugosidad superficial de la pared. Existen varias ecuaciones que se han desarrollado a lo largo de los años para determinar el factor de Darcy, pero uno de los métodos más sencillos para conocer este valor es el Diagrama de Moody (Ver Apéndice A); el cual define la interacción que existe

entre el número de Reynolds y la rugosidad relativa para los distintos valores del coeficiente de fricción f . (White, 2008)

1.4.11 Potencia hidráulica requerida

Para que un líquido sea puesto en movimiento a través de una tubería cerrada, se requiere que se le suministre cierta cantidad de energía; la cual es proporcional al caudal Q del movimiento deseado y al cabezal de carga H_B que debe suministrar la bomba. La ecuación (1.7) relaciona estos valores para obtener la potencia hidráulica que debe ser agregada al líquido para que pueda fluir a las condiciones de caudal especificadas.

$$P_H = Q\rho gH_B \quad (1.7)$$

La bomba que se seleccione debe suministrar esta cantidad de potencia hidráulica para lograr el comportamiento deseado del sistema. Dado que la conversión de energía desde una forma a otra genera pérdidas en la eficiencia de los procesos físicos, se estima la cantidad de energía útil mediante el valor de eficiencia de la bomba; la cual se calcula mediante la ecuación (1.8). (White, 2008)

$$\eta = \frac{\text{Potencia Hidráulica}}{\text{Potencia del equipo}} \quad (1.8)$$

1.4.12 Cavitación

Cuando las condiciones de succión a la entrada de la bomba alcanzan el valor de presión de vapor del líquido que se está aspirando, se puede producir un cambio de fase desde líquido a gas que puede producir cavidades de vapor dentro del líquido en tránsito. A este fenómeno se le conoce como cavitación. Se define al NPSH_d como una propiedad del sistema instalado y al NPSH_r propio de la bomba como valor requerido a comparar para que no se produzca la cavitación en el sistema. El cálculo del NPSH_d se muestra en la ecuación (1.9).

$$NPSH_d = \frac{P_1 - P_v}{\rho g} - Z_1 - H_{L1} \quad (1.9)$$

De donde Z_1 es la altura geodésica de la instalación y H_{L1} es la pérdida de carga en la tubería de succión. Para evitar la cavitación el NPSHd debe ser mayor al NPSHr. (White, 2008)

1.4.13 Bombas y su uso de acuerdo con el líquido a bombear.

Las bombas son máquinas que agregan energía al fluido, permitiendo que este transite desde regiones de mayor a menor presión. Esto se consigue por el movimiento a gran velocidad de un impulsor o por el efecto de forma de sus partes móviles.

En casos donde la viscosidad del fluido a transportar es demasiado elevada, se hace imperativo el uso de bombas de desplazamiento positivo, bombas axiales o bombas de diafragma. En cambio, si los niveles de acidez, sólidos en suspensión y viscosidad tienden a no ser elevados; lo más aconsejable es el uso de bombas rotodinámicas debido a su relativo bajo costo respecto de otros tipos de bombas. (Tecnicafluidos, 2018)

1.4.14 Reglas de Semejanza para bombas

Las bombas centrifugas de características geométricas físicamente similares, tienen reglas que permiten calcular la variación de parámetros como el cabezal de la bomba H_B , el caudal de funcionamiento Q_2 , la Potencia hidráulica necesaria P_2 , y la eficiencia de la bomba η_2 ; de acuerdo con la variación de velocidad del motor n_2 y la variación de diámetro del rotor D_2 . Esto se evidencia en las ecuaciones (1.10) a (1.13). (White, 2008)

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^3 \quad (1.10)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \quad (1.11)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^5 \quad (1.12)$$

$$\frac{0.94 - \eta_2}{0.94 - \eta_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^5 \quad (1.13)$$

1.4.15 Parámetros de variación de velocidad para un motor eléctrico

Las bombas rotodinámicas están acopladas a motores eléctricos, los cuales poseen alimentación por corriente alterna. La velocidad de rotación del eje del sistema bomba-motor, tiene dependencia directa de la frecuencia de oscilación de la corriente alterna de suministro Hz , y el número de polos del bobinado del motor Np . Esto se relaciona mediante la ecuación (1. 14). (Infootec, 2018)

$$n = \frac{115 * Hz}{Np} \quad (1.14)$$

1.4.16 Cálculo de pérdida de carga para sistemas cerrados de riego.

Debido a la complejidad del cálculo de pérdidas en una red de riego, se utilizan aproximaciones experimentales mediante tablas; las cuales permiten establecer las pérdidas que existirán en un sistema de riego de acuerdo con la caracterización de ciertos factores como el número de emisores, el caudal de manejo de los aspersores y el tipo de tubería a usar. (CENTRAL, 2005)

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Metodología de diseño de Posibles Soluciones

Para conocer cuáles son las limitantes y soluciones posibles al problema antes propuesto, se debe hacer una recopilación de las necesidades requeridas; obteniendo así los objetivos y funciones de diseño necesarias para la resolución del problema planteado. El flujo para el desarrollo ordenado de soluciones en ingeniería se expresa en la figura (2.1).

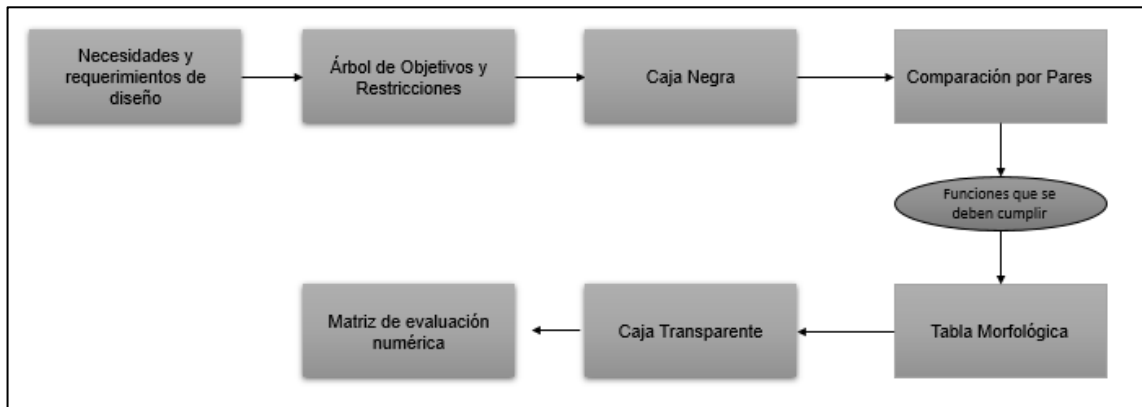


Figura 2.1 Metodología de diseño de soluciones

(Dynn & Little, 2002)

2.1.1 Necesidades y requerimientos de diseño

Los requerimientos básicos obtenidos del cliente y de la inspección preliminar del sistema, arrojaron las siguientes necesidades de diseño:

1. Debe ser seguro
2. Debe permitir el aprovechamiento seguro y eficiente del agua tratada.
3. Debe ser realizable y resistente.
4. Debe aprovechar la infraestructura y la situación geográfica del sector.
5. Debe tener condiciones de servicio estables.

Para satisfacer estos requerimientos, se realizó el levantamiento de información disponible de la planta según mediciones y fuentes indirectas.

2.1.1.1 **Datos instalación actual de la Planta de Tratamiento de Ingenierías.**

Se conocen los siguientes datos sobre la instalación ya existente para la planta y superficie a irrigar:

Tabla 2.1 Información física de la instalación actual de la planta.

Parámetro	Magnitud		Unidad
Profundidad tanque	1.50		m
Capacidad volumétrica de tanque	6.30		m³
Tiempo de llenado de tanque	45.00	25.20	min
Flujo de llenado	8.41	15.00	m³/h
Jornada de trabajo de 7:00 a 15:00	8.00		h
Total de agua por día	67.20	120.00	m³
Costo de tratamiento por metro cúbico	\$ 0.85		
Costo de tratamiento por día	\$57.12	\$102.00	
Costo de tratamiento por mes	\$1,142.40	\$2,040.00	
Diámetro 1- Aspiración de bomba	1 1/2		in
Longitud 1 - Aspiración de bomba	6.04		m
Diámetro 2- Transporte	1 1/2		in
Longitud 2 - Transporte	5.50		m
Diámetro 3- Transporte	3.00		in
Longitud 3 - Transporte	231.78		m
Diámetro 4- Aspersión	1 1/4		in
Longitud 4 - Aspersión	211.07		m
Área efectiva por irrigar	5750.00		m³
Cantidad de agua requerida por metro cuadrado	0.01		m³
Metros cúbicos de agua tratada necesarios para abastecer necesidades de riego	57.50		m³

Autor: De la O Frank

2.1.2 **Árbol de Objetivos y restricciones**

Con el fin de determinar las características importantes que debe poseer nuestro diseño final, se utilizaron los objetivos planteados y las necesidades de diseño para obtener un diagrama que permitió establecer los objetivos de diseño que se

deben cumplir. En la figura (2.2) se presentan lo objetivos como rectángulos blancos y las restricciones como cuadros oscuros con bordes redondeados.

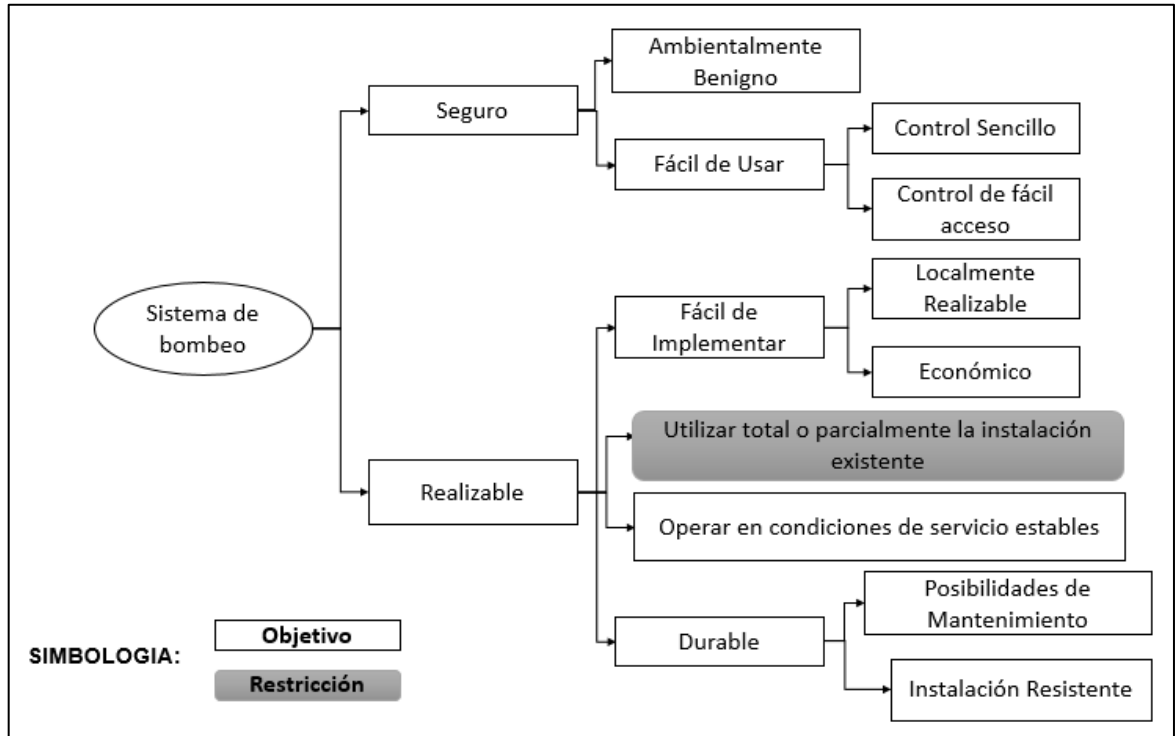


Figura 2.2 Árbol de Objetivos y restricciones para el diseño del sistema de distribución de aguas negras para riego.

Autor: De la O Frank.

2.1.3 Caja negra del sistema

Habiendo obtenido información del árbol de objetivos y parte de conocimiento empírico, se determinan las variables preliminares al diseño; las mismas que permitirán enfocar de mejor manera los pasos siguientes de la metodología de selección. En la figura (2.3) se tienen las variables de entrada al lado izquierdo y las variables de salida al lado derecho para el problema específico que se presentó en un inicio. La caja que se encuentra al centro de la figura, representa un conjunto de transformaciones que deben aplicarse en el flujo de funcionamiento del sistema a diseñar para convertir las variables de ingreso en las variables de salida requeridas, debido a que estas condiciones son desconocidas es que se conoce a este grafico como caja negra del sistema.

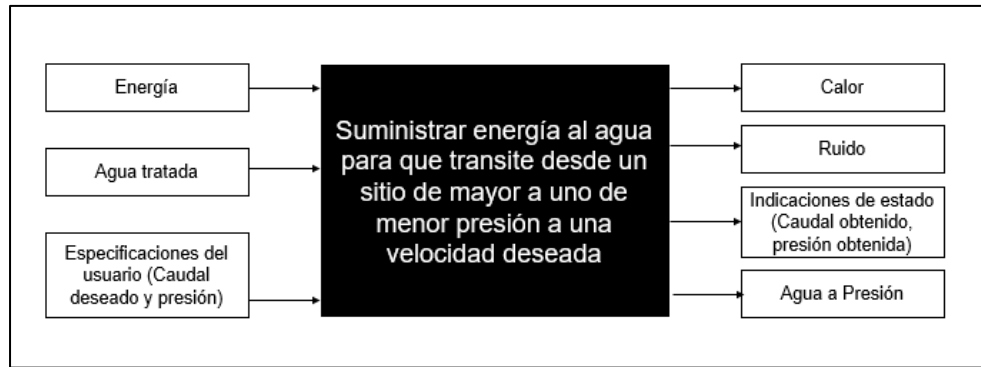


Figura 2.3. Caja negra para el diseño del sistema de distribución de aguas negras para riego.

Autor: De la O Frank.

2.1.4 Tabla de comparación por pares

Para determinar la prioridad de los subobjetivos del árbol de objetivos de la figura (2.2), se procedió a realizar una comparación por pares de las ramas nacientes de las ramificaciones principales correspondientes a “Seguro” y “Realizable”. Esto se evidencia mediante el cuadro de comparación por pares de la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Cuadro de Comparación por pares para el diseño del sistema de distribución de aguas negras para riego.

OBJETIVOS DE DISEÑO	Ambientalmente Benigno	Fácil de Usar	Fácil de Implementar	Utilizar total o parcialmente la infraestructura existente	Operar en condiciones de Servicio Estables	Durable	Calificación	PONDERACIÓN
Ambientalmente Benigno	....	1	0	0	1	0	2	12.50%
Fácil de Usar	1	....	0	0	1	1	3	18.75%
Fácil de Implementar	0	0	....	1	1	0	2	12.50%
Utilizar total o parcialmente la infraestructura existente	0	0	1	....	1	1	3	18.75%
Operar en condiciones de Servicio Estables	1	1	1	1	....	0	4	25.00%
Durable	0	1	0	1	0	....	2	12.50%
TOTAL							16	100.00%

Autor: De la O Frank.

De la Tabla (2.2), es evidente que las condiciones de servicio estables para el sistema son un criterio de importancia, por tanto se planteó una lista de las funciones que deben cumplir todas las posibles soluciones al problema de diseño tal como se enlista a continuación:

- Bombear agua negra tratada
- Transportar agua negra tratada por tuberías apropiadas
- Controlar el sistema
- Medir caudal
- Ensamblar y desensamblar conexiones
- Entregar agua para riego

2.1.5 Tabla morfológica

Con base en la lista de funciones obtenidas por los pasos anteriores, se estableció una tabla morfológica que permitió visualizar los medios disponibles para lograr cada una de las funciones planteadas. Esto se evidencia en la Tabla (2.3).

Tabla 2.3. Tabla morfológica para el diseño del sistema de riego de aguas tratadas.

MEDIOS	1	2	3	4
CARACTERISTICA/ FUNCIÓN				
Bombear agua negra tratada	Bomba axial	Bomba centrífuga	Bomba Periférica	Bomba Neumática
Transportar agua negra tratada por tuberías apropiadas	PVC	PE AD	Acero inoxidable	PE BD
Controlar el sistema	Control ON/OFF	Variador de Frecuencia	Temporizador	PLC
Medir caudal	Rotámetro	Tubo de Pitot	Medidor de desplazamiento positivo	...
Ensamblar y desensamblar conexiones	Soldado	Rosca	A presión	Pegado
Entregar agua para riego	Aspersión	Goteo	Superficie	...

Autor: De la O Frank.

2.1.6 Caja Transparente para el proceso de Distribución de agua.

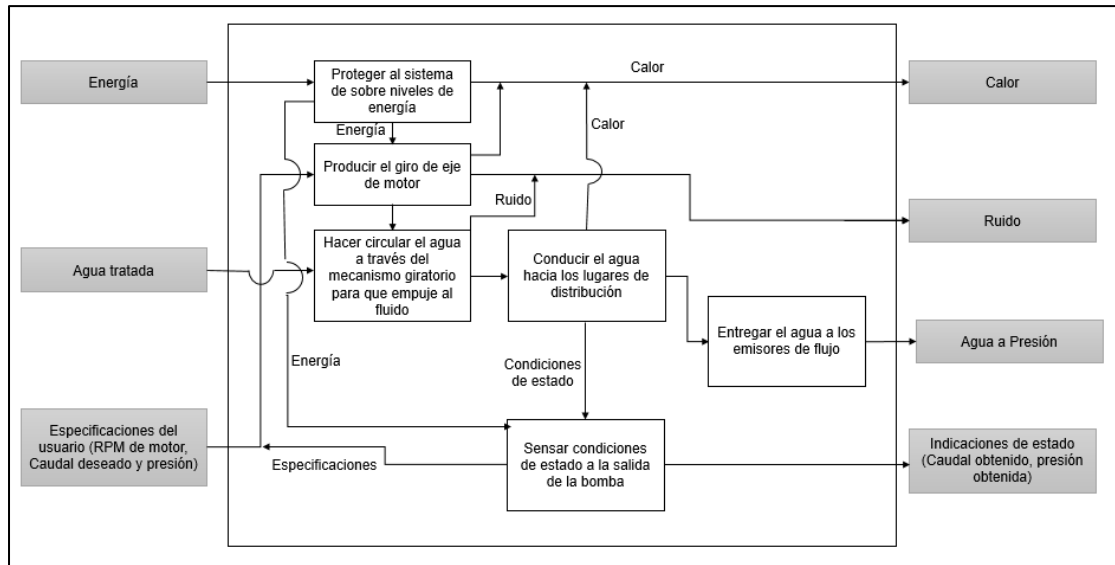


Figura 2.4. Caja transparente para el diseño del sistema de distribución de aguas negras para riego.

Autor: De la O Frank.

En la figura (2.4), se observa la caja transparente del sistema, la cual muestra las interacciones de las variables de entrada con las transformaciones requeridas y las respectivas salidas del flujo de procesos. La información de la caja transparente fue hallada en base a las funciones descritas por la Tabla (2.3).

2.1.7 Matrices de decisión

Para realizar selecciones realistas de diseño que sean factibles, se realizó una comparativa de decisión en dos etapas. En la primera se obtuvo una matriz de selección primaria donde fueron comparadas cinco alternativas obtenidas de las combinaciones de medios de la Tabla (2.3) en base a diez criterios de selección, utilizando las ponderaciones de la Tabla (2.2). Para determinar el cumplimiento de los criterios se utilizó el enmarcado con vistos y para comprobar la falla del criterio se realizó una justificación breve en cada casillero correspondiente, estas declaraciones se evidencian en la Tabla (2.4).

Tabla 2.4 Matriz de selección Preliminar

CRITERIOS	Bomba Periférica con tubería de polipropileno (PP) y uniones roscadas. Control ON/OFF. Riego por goteo	Bomba Neumática, manguera PE AD y conexiones a presión. Control ON/OFF – Variador de frecuencia. Riego por aspersión	Bomba Centrífuga con mangueras de polietileno (PE) y uniones a presión. Control ON/OFF – Variador de frecuencia. Riego por aspersión	Bomba Centrífuga con tubería PVC y PE con conexiones roscadas y a presión. Control ON/OFF – Variador de frecuencia y rotámetro. Riego por aspersión	Bomba axial con tubería acero, conexiones roscadas. Control ON/OFF – Variador de frecuencia. Medidor de desplazamiento positivo. Riego por aspersión
No contaminante	✓	✓	✓	✓	Se pueden producir óxidos y otros residuos
Económico	✓	Requiere cambio total de tuberías	✓	✓	Requiere cambio de tuberías
Apropiado para las condiciones de trabajo estables	Agua tratada podría provocar fallos en el rotor	Caudal pulsátil; no existen limitaciones atmosféricas que impidan el uso de equipo eléctrico	✓	✓	✓
Permite realizar mediciones de Caudal	✓	Caudal pulsátil	✓	✓	✓
Facilidad de adquisición de repuestos	✓	✓	✓	✓	✓
Adaptabilidad a la infraestructura existente	Se requerirían varias bombas de este tipo interconectadas	Requiere cambio total de tuberías e instalación de línea neumática	✓	✓	Se requiere cambio total de tuberías
No requiere infraestructura/equipos extra		Si se requiere flujo continuo se necesita aliviador de fluctuaciones	✓	✓	
Sencillo de manipular	✓	✓	✓	✓	✓
Resistente	✓	✓	✓	✓	✓
Bajo costo de mantenimiento	✓	✓	✓	✓	Requiere mantenimiento constante

Autor: De la O Frank.

De la Tabla (2.4) se obtuvieron dos opciones que cumplían totalmente con los criterios primarios de selección. Por ello, para elegir la alternativa correcta, se procedió a realizar una segunda etapa de selección en la cual se depuraron los criterios anteriores, seleccionando solamente ocho, determinándose la importancia de cada uno de ellos mediante una nueva comparación por pares. Todo esto se expone en la Tabla (2.5).

Tabla 2.5 Comparación por pares para criterios de la etapa segunda de selección

Criterios	No contaminante	Económico	Facilidad de adquisición de repuestos	Adaptabilidad a la infraestructura existente	Requiere infraestructura extra	Sencillo de manipular	Resistente	Bajo costo de mantenimiento	TOTAL	PORCENTUAL
No contaminante	....	1	1	0	0	0	0	1	3	10.00%
Económico	1	....	1	1	1	0	1	1	6	20.00%
Facilidad de adquisición de repuestos	1	1	....	0	0	1	1	1	5	16.67%
Adaptabilidad a la infraestructura existente	0	1	0	....	1	0	0	0	2	6.67%
Requiere infraestructura extra	0	1	0	1	....	0	0	1	3	10.00%
Sencillo de manipular	0	0	1	0	0	....	0	1	2	6.67%
Resistente	0	1	1	0	0	0	....	1	3	10.00%
Bajo costo de mantenimiento	1	1	1	0	1	1	1	....	6	20.00%
TOTAL									30	100.00%

Autor: De la O Frank.

Una vez realizada la comparación por pares de los criterios que se utilizaron en la segunda etapa de toma de decisiones, se procedió a calificar las opciones resultantes de la Tabla (2.4) en función de cada uno de los criterios de la Tabla (2.5). Lo anterior se realizó asignándoles valores numéricos del 1 al 3 en orden de importancia para cada uno de los criterios descritos, donde 1 representa una

correspondencia de “menos importante” y 3 a “más importante”. Las calificaciones de las dos opciones disponibles se muestran en la Tabla (2.6).

Tabla 2.6 Calificaciones de las dos opciones de diseño disponibles en función de los criterios de selección.

CRITERIOS	Bomba centrífuga con mangueras de polietileno (PE) y uniones a presión. Control ON/OFF - Variador de frecuencia y rotámetro. Riego por aspersión		Bomba Centrífuga con tubería PVC y PE con conexiones roscadas y a presión. Control ON/OFF - Variador de frecuencia y rotámetro. Riego por aspersión		TOTAL
	Evaluado	Favorable	Evaluado	Favorable	
No contaminante	2	50.00%	2	50.00%	4
Económico	3	50.00%	3	50.00%	6
Facilidad de adquisición de repuestos	2	40.00%	3	60.00%	5
Adaptabilidad a la infraestructura existente	2	40.00%	3	60.00%	5
Requiere infraestructura extra	3	50.00%	3	50.00%	6
Sencillo de manipular	1	30.00%	2	70.00%	3
Resistente	1	30.00%	2	70.00%	3
Bajo costo de mantenimiento	1	30.00%	2	70.00%	3

Autor: De la O Frank.

Una vez obtenidos los pesos de los criterios de la Tabla (2.5) y las calificaciones de las opciones disponibles, se combinó estos resultados en la Matriz de decisión de la Tabla (2.7); de donde se obtuvo la alternativa que tuviera mayor porcentaje de aceptación.

Tabla 2.7 Matriz de decisión

RESTRICCIONES Y OBJETIVOS DE DISEÑO	Valor (%)	Bomba centrífuga con mangueras de polietileno (PE) y uniones a presión. Control ON/OFF - Variador de frecuencia y rotámetro. Riego por aspersión		Bomba Centrífuga con tubería PVC y PE con conexiones roscadas y a presión. Control ON/OFF - Variador de frecuencia y rotámetro. Riego por aspersión	
No contaminante	10.00%	0.5	10.00%	0.5	10.00%
		5.00%		5.00%	
Económico	20.00%	0.5	20.00%	0.5	20.00%
		10.00%		10.00%	
Facilidad de adquisición de repuestos	16.67%	0.35	16.67%	0.65	16.67%
		5.83%		10.83%	
Adaptabilidad a la infraestructura existente	6.67%	0.4	6.67%	0.6	6.67%
		2.67%		4.00%	
Requiere infraestructura extra	10.00%	0.5	10.00%	0.5	10.00%
		5.00%		5.00%	
Sencillo de manipular	6.67%	0.3	6.67%	0.7	6.67%
		2.00%		4.67%	
Resistente	10.00%	0.3	10.00%	0.7	10.00%
		3.00%		7.00%	
Bajo costo de mantenimiento	20.00%	0.3	20.00%	0.7	20.00%
		6.00%		14.00%	
TOTALES		39.50%		60.50%	

Autor: De la O Frank.

2.2 Diseño del proceso de distribución del agua negra tratada

2.2.1 Análisis de dureza del agua.

Los datos obtenidos de los análisis realizados al agua tratada que produce la planta de tratamiento (ver Apéndice D), fueron comparados con los valores referenciales de normativa para dureza del agua admisible en el transporte de fluido por tuberías; evitando de este modo la selección errónea de equipo vulnerable a incrustaciones. (Organización Mundial de la Salud, 2006)

2.2.2 Análisis Ambiental

Los mismos resultados de los análisis fisicoquímicos fueron comparados con los valores referenciales de normativa TULSMA, para determinar si la calidad de agua obtenida desde la planta era óptima para labores de riego.

2.2.3 Evaluación de capacidades requeridas y disponibles.

Para la descripción y estimación de equipos se realizaron los cálculos y estimaciones necesarias según la sección (1.4.5) de las etapas del proceso; además se entrega, dentro de las especificaciones de diseño y resultados, el rango de control de flujo en función de la capacidad de producción de la planta MBR.

2.2.4 Análisis económico

Se consideró el cálculo del costo de implementación para la línea de distribución en base a los requerimientos de la planta y de la disponibilidad de materiales en el mercado, siendo consistentes con la rama del árbol de objetivos de la Figura (2.2); en la cual se indicó que el proyecto debe ser realizable localmente, es decir, con elementos que puedan ser adquiridos en el mercado nacional.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Resultados de la selección de diseño

De la matriz de decisión de la Tabla (2.7), se obtuvo una ponderación de 60.50% para la opción que implicaba el uso de una bomba Centrífuga con tubería PVC y PE con conexiones roscadas y a presión; control ON/OFF, variador de frecuencia, medición de caudal por rotámetro y riego por aspersión. Debido a que el porcentaje de afinidad de esta opción de diseño fue mayor que el de las demás opciones, esta fue la alternativa desarrollada.

3.2 Desarrollo de la solución de Diseño.

Según el análisis previo, el sistema de bombeo y riego propuesto consta de una bomba centrífuga con sección de aspiración de PVC y sección de descarga de PE BD, con control por variador de frecuencia, temporizador y una red de 8 aspersores para riego al final de la línea de distribución.

La fiabilidad de este diseño radica en su habilidad de variar la frecuencia con la que gira el rotor de la bomba, lo que permite variar la velocidad del flujo en tránsito a través de la carcasa; resultando en un caudal variable en función de las leyes de afinidad para bombas de características geométricamente relacionadas de las ecuaciones (1.10) a (1.14); donde una frecuencia de 60 Hz en la alimentación eléctrica del motor de la bomba corresponderá a un caudal de 15 m³/h, mientras que para velocidades y caudales menores se utilizará la reducción de frecuencia para alterar las condiciones de funcionamiento del flujo en tránsito. Se realizó un proceso iterativo en una hoja de cálculo donde se ingresaron los valores de los parámetros establecidos y se determinó si la capacidad de la bomba encontrada poseía concordancia con los valores disponibles de carga máxima para bombas centrífugas disponibles en el mercado.

3.3 Análisis Ambiental.

Tabla 3.1. Resultados de análisis fisicoquímico realizado a la planta de tratamiento de aguas residuales de ingeniería en agosto del 2018.
(Álava, 2018)

Identificación	Efluente de la planta de tratamiento Ingenierías
Parámetro (Unidades)	Resultado
Dureza total mgCO ₃ Ca/l	71
Sólidos Suspendidos Totales mg/l	2
Nitrógeno total mg/l	42,00
Fosfatos mg/l	13,30
Sulfatos mg/l	34,00
Sodio mg/l	56,35
Potencial de Hidrógeno, in situ -	7,03
Demanda Bioquímica de Oxígeno mgO ₂ /l	14,73
Coliformes Totales NMP/100ml	> 241970

De la Tabla (3.1), los resultados obtenidos del análisis del agua de la planta de tratamiento de aguas residuales del núcleo de ingeniera, versus los parámetros de los niveles de la calidad del agua para riego tomados de norma ambiental vigente TULSMA; cumplen con los límites permitidos en la norma. Sin embargo, el fósforo está 3.3 puntos por encima del límite permitido; pero debido a la aplicación que se le dará a esta agua tratada, éste puede ser considerado no perjudicial, pues el exceso de fósforo solo provoca crecimiento de musgo en casos donde el medio de irrigación se encuentre muy húmedo (Aguamarket, 2017), pudiendo provocar también una absorción disminuida de nutrientes tales como hierro, manganeso y zinc (SMART Fertilizer Management, 2017) .

Por lo tanto, se puede decir que el agua tratada puede servir para su reutilización en aplicaciones de riego. Se observa que la normativa TULSMA no contempla algún parámetro referencial para la dureza del agua.

3.3.1 Análisis de dureza del agua

El valor de 71 mgCO₃Ca/l coloca a las aguas de la planta de tratamiento dentro de la categoría de semiduras; esto según los valores de dureza que plantea la Norma de Calidad de Agua Potable de la OMS, siendo el valor crítico 200 mgCO₃Ca/l, el cual corresponde a un valor de dureza a partir del cual el agua se considera dura y tiene probabilidad del 100% de generar incrustaciones en tuberías con rugosidad media y de bajo caudal. Siendo que el valor de dureza obtenido en el análisis fisicoquímico fue menor que el de la norma, se puede considerar que las aguas tratadas por la planta de ingeniería pueden ser usadas para el transporte de líquido mediante accesorios normales, sin la necesidad de implementar algún tratamiento auxiliar que reduzca los valores de dureza.

3.4 Resultados de dimensionamiento de tuberías.

En la Tabla (3.2) se presenta el resumen de las tuberías seleccionadas en base a las características de funcionamiento exhibidas para la configuración de la red de riego que se propone. (Ver Apéndice A).

Tabla 3.2. Resumen de selección de tuberías para el sistema diseñado.

Tipo Tubería	Diámetro Nominal [in]	Diámetro interno [mm]	Longitud Nominal [m]	Longitud requerida [m]	Cantidad requerida Rollos /Tubería
PVC	2	49.24	6 m	15 m	3
PE BD	3	76.00	50 m	269.85 m	6
PE BD	2	51.00	100 m	300 m	3

Autor: De la O Frank.

Se observó que existirá exceso de material al momento de realizarse la compra de tuberías, debido a la disponibilidad de tuberías en el mercado de acuerdo con

sus dimensiones nominales. Debido a que deberán realizarse operaciones de corte o adecuaciones a lo largo de las líneas de distribución para acoplar los accesorios o realizar los empates entre tramos contiguos de tubería, la diferencia entre las dimensiones disponibles respecto de las dimensiones deseadas será menor.

3.5 Resultados de dimensionamiento de potencia de bombeo.

En la Tabla (3.3) se puede apreciar los parámetros necesarios para realizar la selección de una bomba centrífuga adecuada, la obtención de estos valores se encuentra en el Apéndice B en concordancia con las pérdidas de cargas existentes dentro del sistema calculadas mediante las ecuaciones (1.1) a (1.8) y en función de las dimensiones y materiales de las tuberías seleccionadas según la Tabla (3.2).

Tabla 3.3. Parámetros de diseño obtenidos para la selección del sistema de bombeo.

Parámetro	Magnitud	Unidades
Caudal de trabajo	8.41 a 15	m ³ /h
Cabezal de bomba máx.	33.18	m
NPSHd	9.62	m
Potencia Hidráulica Requerida	1.80	HP

Autor: De la O Frank.

De la Tabla (3.3), nótese que se obtuvo un valor de NPSHd que excede los 9 metros para la instalación planteada; siendo que los valores de NPSHr de las bombas de bajo caudal disponible en el mercado no superan los 5 metros, no se tendrá problemas de cavitación en la línea de succión ni en la carcasa de la bomba; siempre y cuando la tubería de succión este correctamente sellada. El ingreso de aire mediante alguna fisura en la zona de aspiración podría provocar golpeteo y ruido excesivo en la bomba al momento de estar en operación.

3.6 Selección de la bomba centrífuga

De acuerdo con la Tabla (3.3), para satisfacer las necesidades de bombeo del sistema se requiere una bomba que suministre una potencia hidráulica de alrededor de 1.4 HP; sin embargo, dado que las eficiencias típicas de bombeo varían en un rango del 45 al 52% para bombas de bajo caudal, se requerirá una bomba de aproximadamente 3.5 HP. Según la Tabla (2.1), actualmente se está empleando una bomba de 5 HP lo que indica que dicho sistema está sobredimensionado, pues la bomba instalada en la actualidad funciona con una red mucho menos compleja que la planteada para este proyecto (Ver Apéndice A).

En la Tabla (3.4) se indican las especificaciones técnicas de una bomba que cumple con las características requeridas por el sistema.

Tabla 3.4. Información de bomba seleccionada.

Elemento	Especificación	Unidad
Modelo	CP 210 B	
Tipo	Trifásico	
Voltaje	220 / 440	Volt
Amperaje	9 / 4.8.	A
Potencia	4	HP
Cabezal de bombeo a 15 m³/h	37	m
Eficiencia de bombeo a 15 m³/h	0.5	
Velocidad del eje	3450	rpm

Autor: De la O Frank.

3.7 Selección de componentes especializados.

Se seleccionaron aspersores apropiados para la distribución según los ángulos de acción que se requirieron, esto de acuerdo con las dimensiones de la cancha de fútbol, siendo que todos tuvieron un radio de acción de 25 m.

Se seleccionó un variador de frecuencia en función de las características eléctricas exhibidas por la bomba encontrada. Adicionalmente, se seleccionó un reloj temporizador para tener un control de tiempos de irrigación.

Las especificaciones de estos componentes se enlistan a continuación:

- Dos aspersores pop-up cañón de riego de 360°, modelo VYR-60, salida de ½ pulgada para riego sumergido
- Seis aspersores de metal tipo cañón para riego De 1/2 Tipo Jolly Tw
- Una válvula pie en la línea de succión
- Un variador de frecuencia trifásico de 5 HP
- Un Timer temporizador de 5 HP

3.8 Determinación de frecuencias de trabajo en función del caudal requerido.

El operador de la planta deberá sensar el caudal de salida que produce la planta y posteriormente programar el variador de frecuencia en un valor, tal que le permita al sistema de distribución planteado, transportar un caudal de líquido ligeramente menor al caudal de alimentación del tanque (Ver Apéndice B). Para conocer los rangos de valores de frecuencia que permitan obtener determinados caudales, se utilizó una hoja de cálculo. Se asumieron coeficientes de pérdida por accesorios de dos tipos: ideales y sobredimensionados; ésto con el objetivo de hallar los rangos de frecuencia que se necesitan para mantener un valor de caudal constante ante las variaciones de cabezal de bombas, los cuales podrían llegar a variar debido a la apertura parcial de alguna válvula. La tabla resultante se encuentra en el Apéndice C.

3.9 Determinación de las secuencias de accionamiento

Debido a las características enunciadas para el sistema en la sección (3.2), se tiene un sistema que requerirá revisión a modo parcial; es decir, las válvulas acopladas a lo largo de la línea deben ser abiertas de forma manual por un operador, el mismo que tendrá que encender el sistema eléctrico ingresando los valores de frecuencia en el variador.

3.10 Análisis de costos

El desglose de los costos involucrados en la adquisición e instalación del sistema se puede observar en la Tabla (3.5), en donde en el elemento 19 se puede obviar para propósitos de adecuación de este proyecto.

Tabla 3.5. Resumen de costos para la implementación del sistema propuesto.

N°	Descripción	Costo unitario [USD]	Unidades	Costo [USD]
1	Bomba 4 HP trifásica	850.00	1	850.00
2	Variador de frecuencia y temporizador	720.00	1	720.00
3	Breaker trifásico de 16 A	6.00	1	6.00
4	Instalación eléctrica	168.90	1	168.90
5	Rotámetro	75.00	1	75.00
6	Filtro de línea tipo Y	45.00	1	45.00
7	Codos de 90° de 2 in	6.95	2	13.90
8	Uniones Universales 2 in	12.48	2	24.96
9	Tramos de Tubería PVC 2 in	55.85	2	111.70
10	Neplo de 1 in	1.10	1	1.10
11	Neplo de 1 1/2 in	1.50	1	1.50
12	Reducción de 2 a 1 in	4.65	1	4.65
13	Reducción de 3 a 2 in	6.35	4	25.40
14	Acoples polipropileno 2 in	3.45	11	37.95
15	Tee	1.40	3	4.20
16	Válvula de globo	18.50	3	55.50
17	Válvula pie	43.00	1	43.00
18	Válvula antirretorno	30.00	1	30.00
19	Manguera negra de 3 in	115.00	0	0.00
20	Aspersores Pop-Up 360 °	55.00	2	110.00
21	Cañones de riego de 25 m	38.50	6	231.00
22	Kit de ensamble para Aspersores Pop-Up	43.00	1	43.00
23	Manguera negra de 2 in	95.00	4	380.00
24	Instalación hidráulica	800.00	1	800.00
			Subtotal	3,782.76
			IVA 12%	453.93
			Total	4,236.69

Autor: Frank De la O

Se obtuvo un precio de implementación del proyecto de USD \$ 4,236.69 el cual incluye la instalación del sistema.

Utilizar agua potable para el riego de los 5,750 m² conlleva al gasto de USD \$9,356.40 anual; mientras que la cantidad de agua tratada para abastecer la misma demanda de riego solo representa un costo de USD \$ 7,038.00.

La implementación del proyecto más el valor monetario generado por la demanda de agua tratada por año, generan un costo de USD \$11,274.00 el primer año.

Para recuperar la inversión del proyecto se requerirá de aproximadamente dos años, en donde a partir del tercer año se percibirá ahorros económicos constantes; los cuales se estiman en USD \$2,318.00 (Ver Apéndice D)

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- La instalación existente se encuentra sobredimensionada debido a que los equipos instalados presentan una mayor capacidad de la requerida para funcionar bajo condiciones de trabajo óptimas, haciendo un uso ineficiente del sistema. Esto se observa al realizar el análisis comparativo de potencia de bombeo requerida en función de los emisores de agua, pues la red de riego propuesta en este proyecto resultó ser mucho más compleja que la actualmente existente; requiriendo una menor potencia de bombeo. El sobredimensionamiento de equipo de bombeo siempre resulta en un mayor consumo de energía eléctrica, además de provocar un vaciado rápido del tanque de almacenamiento; lo cual provocaría que la bomba trabajase en vacío, ocasionando un deterioro irreversible del equipo. Las razones por las cuales los equipos actualmente instalados fueron sobredimensionados, podrían deberse a una planificación a futuro del uso de estas aguas en aplicaciones de riego sobre otras regiones del campus.

- El diseño propuesto permite una adecuada distribución del volumen de efluentes producidos por la planta de tratamiento de aguas residuales en las horas donde se realice el riego. El funcionamiento del sistema será regulado con un variador de frecuencia, en caso de ser necesario, para evitar daños en el mismo; manteniendo el flujo bombeado por el sistema de riego por debajo de la tasa de flujo de llenado proporcionado por el proceso de tratamiento. Además, el sistema propuesto cumple con los objetivos y restricciones de diseño establecidas, siendo sencillo de utilizar e implementar y durable; permitiendo la operación de la red de riego en condiciones de servicio estables e ininterrumpidas para toda su jornada de trabajo.

- El sistema de distribución y riego propuesto consta de una bomba centrífuga, la cual cumple con los requerimientos de potencia hidráulica del sistema de bombeo: un controlador de la velocidad de flujo, tuberías de PVC y PE BD, aspersores para

riego y demás materiales, complementarios para su instalación. Teniendo un costo total de USD \$5,009.49 incluyendo los costos de instalación.

4.2 Recomendaciones

- Se sugiere la implementación del diseño propuesto, pero se recomienda a futuro revisar la factibilidad de hacer uso de la bomba de 5 HP que se encuentra actualmente instalada; en donde deberá realizarse una identificación apropiada de las curvas de trabajo de la bomba, pues dicho equipo no posee especificaciones del fabricante; con lo cual fue imposible usarla en el desarrollo de este proyecto.
- Se recomienda capacitar a los operadores sobre la manipulación del variador de frecuencia, con la finalidad de que el sistema trabaje en condiciones óptimas.
- Se sugiere comprobar que las válvulas acoplada a lo largo de la línea de distribución se encuentren abiertas en su totalidad antes de que el sistema se encuentre operativo, para así evitar que el sistema sufra fallos y sobrepresiones.

BIBLIOGRAFÍA

Aguamarket. (2017). *Fósforo en aguas residuales*. Obtenido de Aguamarket.com: <https://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=3771>

Álava, Á. (2018). *Informe de análisis 2*. Guayaquil.

Bravo Mero, T. B., Mieles Moreira, J. J., Velasco Mero, A. C., & Vera Lara, M. G. (2008). Diseño, calculo e instalación de un sistema de riego para la cancha de fútbol del complejo deportivo de la Universidad Técnica de Manabí del cantón Portoviejo. *n sistema de riego para la cancha de fútbol del complejo deportivo de la Universidad Técnica de Manabí del cantón Portoviejo*. Portoviejo, Manabí, Ecuador: Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería Agrícola.

CENTRAL, F. (2005). *El riego*. Recuperado el 2 de enero de 2019, de El riego: <http://elriego.com/informacion-tecnica/tablas/>

Dynn, C., & Little, P. (2002). *El proceso de diseño en ingeniería*. Mexico: Limusa, S.A.

Ecuaplastic S.C. (2018). *Diámetros comerciales para mangueras de PE*. Obtenido de Ecuaplastic.com: <http://www.ecuaplastic.com/index.php/conduccion-de-agua>

ESPOL, G. F. (2019). *Desglose de costos por concepto de agua potable*. Guayaquil: Espol.

Infootec. (2018). *Motores electricos*. Obtenido de Infootec.net: <https://www.infootec.net/motores-electricos-trifasicos/>

Legrand Electric. (23 de 11 de 2018). *Catálogo de Productos*. Obtenido de https://www.legrand.cr/?gclid=CjwKCAiA45njBRBwEiwASnZT51grDyB4IWCjdbACvCD5GNHUcKGk2ZOMMptqjuHKpK0uS77TVWnINhoCLtYQAvD_BwE

Ministerio del Ambiente. (4 de noviembre de 2015). *Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua*. Obtenido de Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente : http://gis.uazuay.edu.ec/ierse/links_doc_contaminantes/REGISTRO%20OFICIAL%20387%20-%20AM%20140.pdf

Omega. (15 de 10 de 2018). *Rotámetros*. Obtenido de <https://es.omega.com/prodinfo/rotametros.html>

Orcés Hilbron, R., García Gallardo, A., & Tobalina Dito, C. (2005). Proyecto de Inversión para el Aprovechamiento de las Aguas Residuales de la Espol. *Proyecto de Inversión para el Aprovechamiento de las Aguas Residuales de la Espol*. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Organizacion Mundial de la Salud. (2006). Guías para la calidad del agua Potable. Vol.1 -Recomendaciones. *Guías para la calidad del agua Potable Vol1* - (3era Edición).

Pedrollo. (2018). *Electrobombas centrífugas*. Obtenido de pedrollo.com: http://docs.wixstatic.com/ugd/67928d_8220e4f2bb804ac99789da6e3322ebbe.pdf

Plastigama. (2018). *Catálogo de Productos de línea Predial*. . Obtenido de plastigama.com: <http://plastigama.com/wp-content/uploads/2018/09/HT-PVC-Roscable-2018.pdf>

Schneider Electric. (25 de 11 de 2018). *Productos*. Obtenido de <https://www.schneider-electric.com.pe/es/all-products>

SMART Fertilizer Management. (2017). *El fósforo en suelo y agua*. Obtenido de smart-fertilizer.com: <https://www.smart-fertilizer.com/es/articles/phosphorus>

Tecnicafluidos. (2018). *Bombas centrífugas*. Obtenido de Tecnica de fluidos: <https://www.tecnicafluidos.es/bombas-centrifugas-metalicas-t-9-es>

vyrsa. (2018). *Catálogo de Productos para riego*. . Obtenido de vyrsa.com: <https://www.vyrsa.com/es/catalogo/productos/vyr-50/>

White, F. M. (2008). *Mecánica de Fluidos*. Madrid: S.A McGraw-Hill.

APÉNDICES

APÉNDICE A

GRÁFICOS DE AYUDA Y DE DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE RIEGO

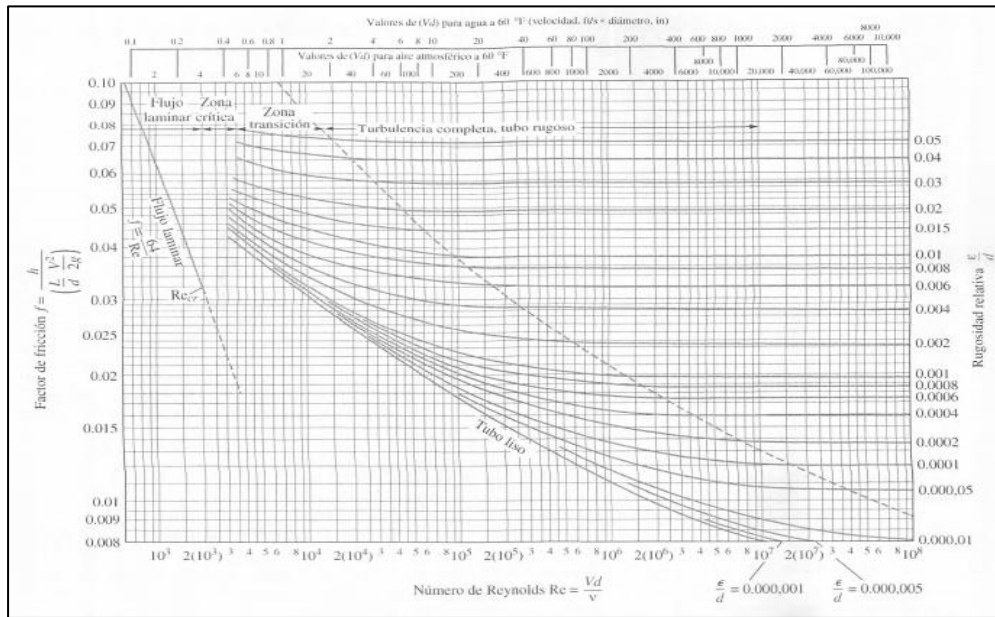


Figura 1. Diagrama de Moody (White, 2008)

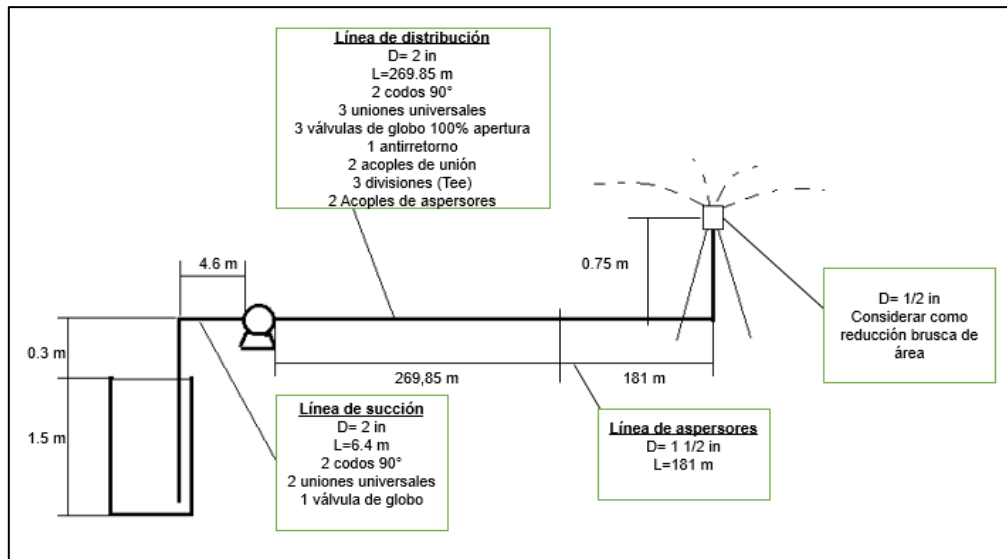


Figura 2. Diagrama de las condiciones de trabajo del sistema.

Autor: De la O Frank.

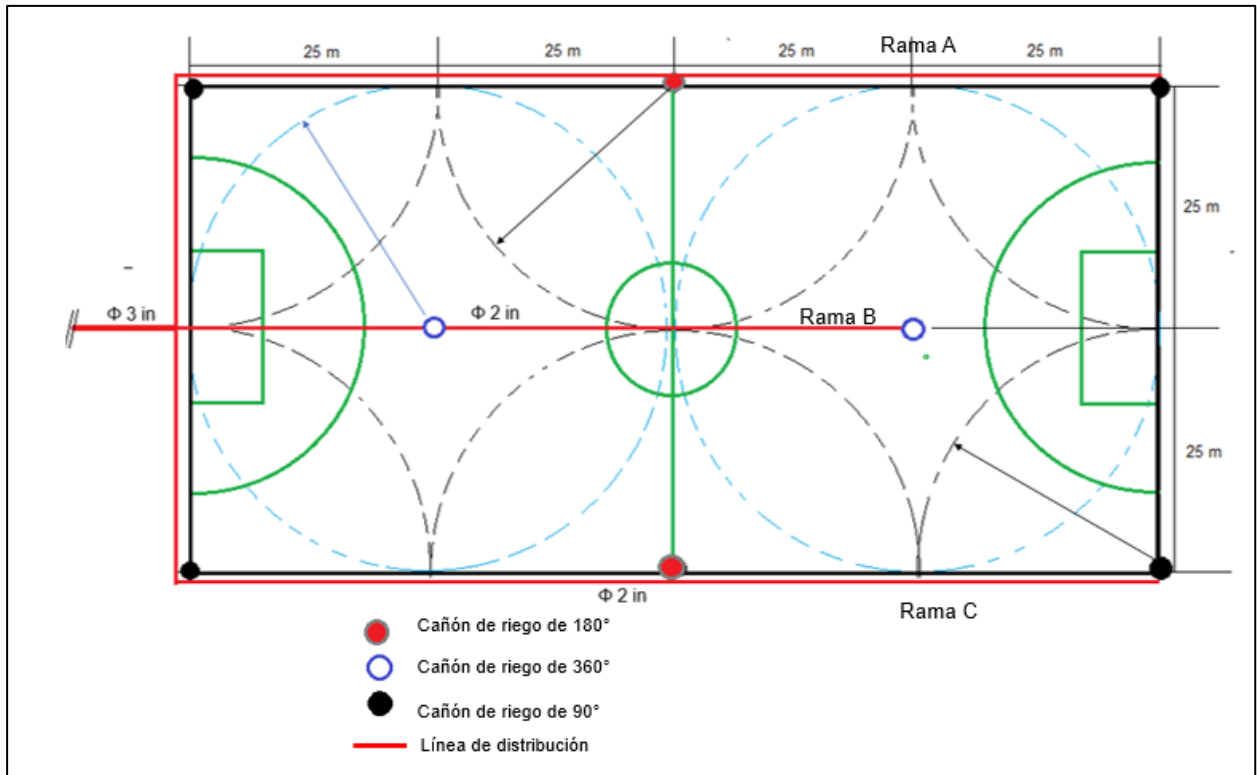


Figura 3. Distribución de puntos de riego en la cancha

Autor: De la O Frank.

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{kg/m}^3$	$\mu, \text{N} \cdot \text{s/m}^2$	$\nu, \text{m}^2/\text{s}$	$T, ^\circ\text{F}$	$\rho, \text{slug/ft}^3$	$\mu, \text{lb} \cdot \text{s/ft}^2$	$\nu, \text{ft}^2/\text{s}$
0	1000	1.788×10^{-3}	1.788×10^{-6}	32	1.940	3.73×10^{-5}	1.925×10^{-5}
10	1000	1.307×10^{-3}	1.307×10^{-6}	50	1.940	2.73×10^{-5}	1.407×10^{-5}
20	998	1.003×10^{-3}	1.005×10^{-6}	68	1.937	2.09×10^{-5}	1.082×10^{-5}
30	996	0.799×10^{-3}	0.802×10^{-6}	86	1.932	1.67×10^{-5}	0.864×10^{-5}
40	992	0.657×10^{-3}	0.662×10^{-6}	104	1.925	1.37×10^{-5}	0.713×10^{-5}
50	988	0.548×10^{-3}	0.555×10^{-6}	122	1.917	1.14×10^{-5}	0.597×10^{-5}
60	983	0.467×10^{-3}	0.475×10^{-6}	140	1.908	0.975×10^{-5}	0.511×10^{-5}
70	978	0.405×10^{-3}	0.414×10^{-6}	158	1.897	0.846×10^{-5}	0.446×10^{-5}
80	972	0.355×10^{-3}	0.365×10^{-6}	176	1.886	0.741×10^{-5}	0.393×10^{-5}
90	965	0.316×10^{-3}	0.327×10^{-6}	194	1.873	0.660×10^{-5}	0.352×10^{-5}
100	958	0.283×10^{-3}	0.295×10^{-6}	212	1.859	0.591×10^{-5}	0.318×10^{-5}

Figura 4. Densidad y viscosidad del agua a 1 atm. (White, 2008)

APÉNDICE B

CÁLCULOS Y DIMENSIONAMIENTOS DEL SISTEMA

Caudal por bombear

Se hace un balance de masa para determinar el flujo que debe manejar la bomba, donde el flujo de la planta de tratamiento MBR debe equipararse con el flujo que sale a través de la tubería de aspiración de la bomba y la fuga del rebosadero. Ya que el proyecto se trata de aprovechar al máximo el agua tratada, se debe asumir el flujo del rebosadero despreciable, es decir la totalidad del flujo debe ir destinada a la aspiración de la bomba, esto es:

$$Q_{Planta\ MBR} - Q_{aspiracion\ Bomba} - Q_{fuga\ rebosadero} = 0$$

Debido a que en la práctica es difícil que el caudal de aspiración equipare al caudal entrante al tanque de almacenamiento, se estima necesaria la siguiente condición para evitar de ese modo que el equipo de bombeo trabaje en vacío:

$$Q_{aspiracion\ Bomba} \leq Q_{Planta\ MBR}$$

Por lo tanto el caudal de trabajo de la bomba para el sistema es:

$$Q_{Trabajo} = Q_{aspiracion\ Bomba} \leq (8.41 - 15) m^3/h$$

Es decir, el caudal de trabajo debe mantenerse por debajo o igual al caudal de funcionamiento con el que esté trabajando la planta de tratamiento.

Dimensiones de tubería.

Sección de aspiración de la bomba

Para dimensionar las tuberías a usar en el sistema, es necesario seleccionar un diámetro de tubería de aquellas que se encuentre disponible en el mercado. Se utilizó el dato de diámetro interno para el cálculo de capacidad de bombeo requerida, tal como se evidencia en la siguiente figura.

Diámetro Nominal	CÓD.	Diám. exterior	Espesor	Diám. interior	Presión de trabajo		
					plg	mm	kg/cm ²
½	926092	21.34	3.73	13.88	420	2.90	29.5
¾	926094	26.67	3.91	18.85	340	2.34	23.9
1	926091	33.40	4.55	24.30	320	2.21	22.5
1 ¼	926090	42.16	4.85	32.46	260	1.79	18.3
1 ½	926089	48.26	5.08	38.10	240	1.65	16.9
2	926093	60.32	5.54	49.24	200	1.38	14.1

Figura 1 Diámetros comerciales para tubería de PVC.
(Plastigama, 2018)

Sección de descarga de la bomba

Se eligió una tubería de PE BD con diámetro nominal de 3 pulgadas y diámetro interno de 71 mm para la sección de transporte.

Además, se seleccionó una tubería del mismo material con diámetro nominal de 2 pulgadas y diámetro interno de 49.21 mm para la sección de alimentación de los emisores.

CODIGO	NOMBRE	IDENTIFICACION	DIAMETRO		ESPESOR PARED (mm)
			INT.(mm)	EXT.(mm)	
A-1/2-125	Manguera para agua de 1/2 pulg.-125 psi	Marca	15,50	20,10	2,30
A-1/2-150	Manguera para agua de 1/2 pulg.-150 psi	Marca	15,50	20,75	2,63
A-1/2-180	Manguera para agua de 1/2 pulg.-180 psi	Marca	15,50	21,70	3,10
A-1/2-200	Manguera para agua de 1/2 pulg.-200 psi.	Marca	15,50	22,30	3,40
A-3/4-100	Manguera para agua de 3/4 pulg.-100 psi	Marca	20,00	24,85	2,43
A-3/4-125	Manguera para agua de 3/4 pulg.-125 psi	Marca	20,00	25,70	2,85
A-3/4-160	Manguera para agua de 3/4 pulg.-160 psi	Marca	20,00	26,40	3,20
A-1-80	Manguera para agua de 1 pulg.-80 psi	Marca	20,00	26,00	3,00
A-1-120	Manguera para agua de 1 pulg.-120 psi	Marca	26,00	31,85	2,93
A-1-150	Manguera para agua de 1 pulg.-150 psi	Marca	26,00	32,70	3,35
A-1 1/4-120	Manguera para agua de 1 1/4 pulg.-120 psi	Marca	33,00	40,00	3,50
A-1 1/2-80	Manguera para agua de 1 1/2 pulg.-80 psi	Marca	40,00	46,70	3,35
A-1 1/2-100	Manguera para agua de 1 1/2 pulg.-100 psi	Marca	40,00	47,40	3,70
A-2-80	Manguera para agua de 2 pulg.-100 psi	Marca	51,00	58,80	3,90
A-2-100	Manguera para agua de 2 pulg.-80 psi	Marca	51,00	59,30	4,15
A-2-120	Manguera para agua de 2 pulg. 120 psi	Marca	51,00	60,50	4,75
A-3-80	Manguera para agua de 3 pulg.-80 psi	Marca	76,00	89,00	6,50
A-4-70	Manguera para agua de 4 pulg.-70 psi	Marca	101,00	116,70	7,85

Figura 2. Diámetros comerciales para mangueras de PE. (Ecuaplástico S.C, 2018)

Calculo de pérdida de carga por fricción en tuberías y mangueras.

Se utilizó la ecuación de Bernoulli para calcular la carga de la bomba utilizando como punto de referencia 1 a la entrada de succión que se encuentra sumergida en el tanque y como punto de referencia 2 a la salida del aspersor.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + H_B = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_L$$

Despejándola para hallar la carga de la bomba, se obtiene:

$$H_B = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1 + H_L$$

Para hallar las velocidades en los puntos 1 y 2 se divide el caudal para las áreas transversales respectivas.

$$V_1 = \frac{4 * Q_{trabajo}}{\pi D_1^2} = \frac{4 * 15}{\pi (49.24/1000)^2 * 3600} = 2.19 \text{ m/s}$$

$$V_2 = \frac{4 * Q_{trabajo}}{\pi D_2^2} = \frac{4 * 15}{\pi (76/1000)^2 * 3600} = 0.92 \text{ m/s}$$

$$V_3 = \frac{4 * Q_{trabajo}}{\pi D_3^2} = \frac{4 * 15}{\pi (51.02/1000)^2 * 3600} = 2.04 \text{ m/s}$$

De la Figura 2 del apéndice A se puede ver claramente las presiones de entrada y salida del sistema, así como las alturas geodésicas del sistema, lo cual se resume en lo siguiente:

$$P_2 = P_a$$

$$P_1 = P_a + \rho g h_1 = P_a + 996 * 9.81 * 1.8 = (P_a + 17587.37) \text{ Pa}$$

$$Z_2 = 0.75 \text{ m}$$

$$Z_1 = -1.8 \text{ m}$$

Los valores de densidad y viscosidad necesitados para estos cálculos fueron obtenidos de la Figura 3 del apéndice A para una temperatura de 30°C y se enuncian a continuación.

$$\rho_{agua @30^{\circ}C} = 996 \text{ Kg}/m^3$$

$$\mu_{agua @30^{\circ}C} = 0.799 \times 10^{-3} \text{ Kg}/m \cdot s$$

Calculando los números de Reynolds para las secciones se obtuvo:

$$Re_1 = \frac{\rho V_1 D_1}{\mu} = 134305.06$$

$$Re_2 = \frac{\rho V_2 D_2}{\mu} = 87015.54$$

$$Re_3 = \frac{\rho V_3 D_3}{\mu} = 129670.22$$

Se obtuvo la rugosidad de los materiales usados, los cuales fueron PVC para la entrada de succión y PE se tiene en ambos casos un coeficiente de rugosidad similar de 0.0015 obteniéndose rugosidades relativas iguales a:

$$\frac{\varepsilon}{D_1} = \frac{0.0015 \text{ mm}}{49.24 \text{ mm}} = 0.0003$$

$$\frac{\varepsilon}{D_2} = \frac{0.0015 \text{ mm}}{76 \text{ mm}} = 0.0002$$

$$\frac{\varepsilon}{D_3} = \frac{0.0015 \text{ mm}}{51.02 \text{ mm}} = 0.0003$$

A continuación, con el diagrama de Moody de la Figura 1 del apéndice A se obtienen los coeficientes de fricción de Darcy siguientes:

$$f_1 = 0.017$$

$$f_2 = 0.018$$

$$f_3 = 0.017$$

Los coeficientes de carga son obtenidos de la referencia (White, 2008) y se enuncian en la tabla siguiente:

Tabla 1. Coeficientes de pérdida de carga por accesorios para las tres secciones de tuberías del sistema.

Sección	Elemento	Coefficiente K	Cantidad	Subtotal	Total por Sección
Tubería de succión	Válvula Pie	1	1	1	3.42
	Codos de 90°	0.25	2	0.5	
	Reducción brusca de diámetros de 2 a 1 1/2 in	0.22	1	0.22	
	Uniones Universales	0.85	2	1.7	
Tubería de descarga	Aumento brusco de diámetro de 1 a 2 in	0.6	1	0.6	4.4
	Acoples polipropileno 2 in	0.4	2	0.8	
	Tee para cebado	0.5	2	1	
	Filtro de línea	2	1	2	
Manguera de transporte	Acople de rosca a presión	0.25	2	0.5	33.6
	Aumento brusco de diámetro de 2 a 3 in	0.37	1	0.37	
	Uniones acoples	0.85	4	3.4	
	Acoples polipropileno 2 in	0.4	11	4.4	
	Tee	1.4	3	4.2	
	Válvula de globo	6.8	3	20.4	
Manguera de Aspersores	Válvula antirretorno	0.33	1	0.33	21.04
	Acoples rápidos para aspersores	0.5	8	4	
	Neplo 1 1/2 in	0.45	8	3.6	
	Tee reducción de 2 a 1 1/2	1.3	8	10.4	
	Cañón de riego de 1 1/2 in	0.38	8	3.04	

Autor: De la O Frank.

Luego en base a la Figura A.2 y los coeficientes de pérdida de carga para cada uno de los elementos en las líneas se obtuvo:

$$H_L = \left(\left(f_1 \frac{L_1}{D_1} \right) + \sum k_{i1} \right) \frac{V_1^2}{2g} + \left(\left(f_{12} \frac{L_{12}}{D_{12}} \right) + \sum k_{i12} \right) \frac{V_{12}^2}{2g} + \left(\left(f_2 \frac{L_2}{D_2} \right) + \sum k_{i2} \right) \frac{V_2^2}{2g}$$

$$H_L = \left(\left(0.017 * \frac{15}{0.04924} \right) + 3.42 + 4.4 \right) \frac{2.19^2}{2(9.8)} + \left(\left(0.018 * \frac{269.85}{0.076} \right) + 33.6 \right) \frac{0.92^2}{2(9.8)} \\ + \left(\left(0.017 * \frac{300}{0.05102} \right) + 21.04 \right) \frac{2.04^2}{2(9.8)}$$

$$H_L = 26.71 \text{ m}$$

Ahora el cálculo de las pérdidas en la línea de riego se realiza mediante una metodología de fabricante de sistemas de riego que se describe como sigue a continuación:

De la Grafica 3 del Apéndice A se determina cual es la rama o línea de riego que presenta mayor pérdida de carga, de donde se observa que puede ser tanto la A como la C, se asume el ramal A para el análisis considerando el flujo de trabajo dividido en las tres secciones por igual, es decir, 5 m³/h.

Con datos de caudal y el diámetro de tubería seleccionado se consultaron las tablas del fabricante (CENTRAL, 2005) , hallando el valor del coeficiente adimensional **F** el cual representa el porcentaje de la longitud de tubería que fue asumida como pérdida por la apertura del número de aspersores acoplados.

El valor **F** resultante fue 0.410, es decir, la longitud ficticia de pérdida resultante será:

$$L_{Ficticia} = L_{Real} * F \\ L_{Ficticia} = 100 * 0.410 = 41 \text{ m}$$

Del mismo modo se obtiene el valor adimensional de **J** que está en función del diámetro de tubería seleccionado, de donde se obtuvo:

$$L_{Perdida} = 41 \text{ m} * 0.016 = 0.65 \text{ m}$$

Este valor de longitud de pérdida debe multiplicarse por el número de ramas existentes en el sistema e incrementar este valor en un 10% para asumir los valores de corrección, por lo tanto el valor de pérdidas en la sección del sistema de riego es:

$$h_{Perdida} = L_{Perdida} * 3 * 1.10 \\ h_{Perdida} = 0.65 * 3 * 1.10$$

$$h_{perdida} = 2.145 \text{ m}$$

Entonces, el cabezal de la bomba resulta:

$$H_B = \frac{17587.37}{996 * 9.8} + \frac{2.19^2 - 2.04^2}{2 * 9.8} + 0.75 + 1.8 + (26.71 + 2.145)$$

$$H_B = 33.18 \text{ m}$$

Cálculo de la Potencia Hidráulica

Conociendo el valor del cabezal de la bomba y el caudal de trabajo se procede al cálculo de la potencia hidráulica requerida.

$$P_H = Q\rho gH_B$$

$$P_H = \frac{15}{3600} [m^3/s] * 996 [Kg/m^3] * 9.81 [m/s^2] * 33.18 [m]$$

$$P_H = 1349.23[W] \approx 1.80 [HP]$$

Calculo del NPSHd

El cálculo de este parámetro fue comparado con los valores disponibles de las bombas en el mercado para de este modo evitar la selección de una bomba en donde se produzca cavitación.

$$NPSHd = \frac{P_1 - P_v}{\rho g} - Z_1 - H_{L1}$$

$$NPSHd = \frac{101325 + 17587.37 - 4246.3}{996 * 9.81} - 1.8 - 0.31$$

$$NPSHd = 9.62 \text{ m}$$

APÉNDICE C

SELECCIÓN DE LA BOMBA REQUERIDA

De acuerdo con la disponibilidad del mercado se estimó correcto el uso del catálogo de bombas Pedrollo según las curvas de desempeño de las figuras A.5 y A.6.

Bomba Pedrollo CP210 Rodete tipo B – NPSHr =3 m 60 Hz – 3450 RPM – 4HP – 3PH

Se seleccionó de bomba según especificaciones de Catálogo

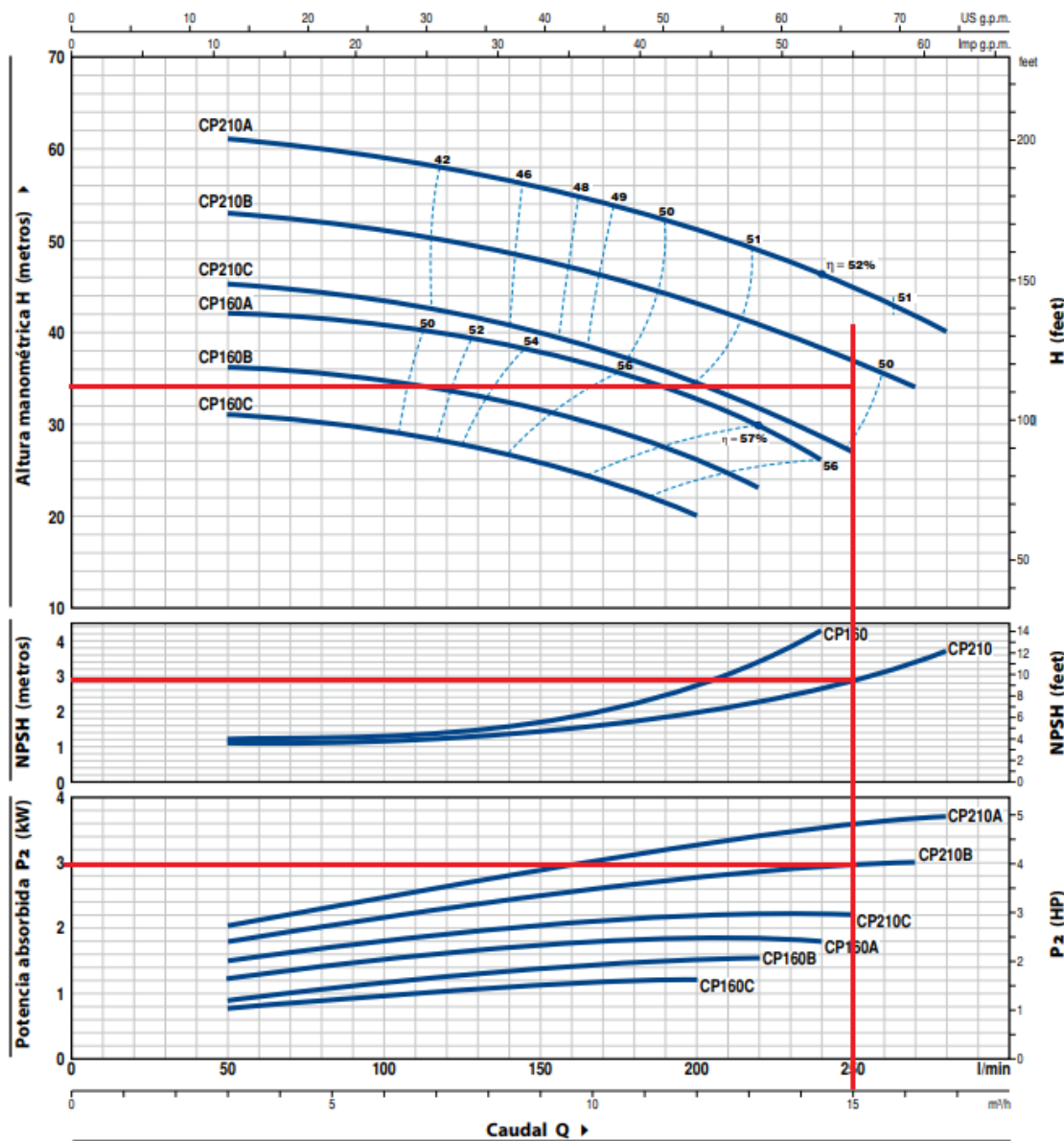


Figura 1 Curvas de desempeño para la selección de bomba.
(Pedrollo, 2018)

MODELO		POTENCIA (P ₂)			Q	H															
Monofásica	Trifásica	kW	HP	▲		m ³ /h	0	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.2	14.4	15	16.2	16.8		
					l/min	0	50	75	100	125	150	175	200	220	240	250	270	280			
CPm 160C	CP 160C	1.1	1.5	IE2	H metros	32	31	30.5	29.5	28	26	23	20								
CPm 160B	CP 160B	1.5	2	IE3		37	36	35.5	34.5	33.5	31.5	29	26.5	23							
-	CP 160A	2.2	3			43	42	41.5	40.5	39.5	38	35.5	33	30	26						
CPm 210C	CP 210C	2.2	3			46	45.5	44.5	43.5	42	40	37.5	34.5	32	28.5	27					
-	CP 210B	3	4			54	53	52	51	49.5	48	45.5	43	40	38.5	37	34				
-	CP 210A	4	5.5			61	61	60	59	57.5	56	53.5	51	49	46.5	45	42	40			

Figura 2. Tablas de desempeño para la selección de bomba
(Pedrollo, 2018)

Selección de aspersores para riego.

Se consideró a los aspersores como coeficiente de pérdidas K por reducción brusca de diámetro, la selección del modelo de aspersores a emplearse en el sistema se observa en la Figura 3.



Figura 3. Cañón para riego
(vyrsa, 2018)

Dispositivos de control

De acuerdo con el modelo de bomba seleccionado se seleccionó un variador de frecuencia trifásico para el control de la velocidad del sistema y un temporizador programable para determinar la cantidad de riego que debe suministrarse al sistema de manera automática.



Figura 4. Variador de frecuencia 5 HP tipo Mobdus.
(Schneider Electric, 2018)



Figura 5. Temporizador Legrand 03753 (temporizador) 16a/220v.
(Legrand Electric, 2018)

Indicador de caudal

Se optó por la instalación de un rotámetro a la salida de la planta de tratamiento para realizar mediciones de caudal, regular la frecuencia de la corriente al motor y así aproximar el caudal manejado por la bomba con el caudal que utilice la planta según la tabla de relación caudal-frecuencias del sistema.



Figura 6. Rotámetro 250 GPM (15 m³/h).
(Omega, 2018)

Tabla 1. Resultados de frecuencias del variador en función del caudal deseado.

Caudal deseado	Rango de frecuencia		RPM
	Frecuencia mínima [Hz]	Frecuencia máxima [Hz]	
8.00	31.00	32	1801.67
8.25	32.00	33	1897.50
8.50	33.00	34	1955.00
9.00	35.00	36	2070.00
10.00	39.00	40	2300.00
11.00	42.00	44	2530.00
12.00	46.00	48	2760.00
13.00	50.00	52	2990.00
14.00	54.00	56	3220.00
15.00	58.00	60	3450.00

Autor: De la O Frank.

APÉNDICE D

CÁLCULO DE COSTOS DE AGUA POTABLE PARA LAS NECESIDADES DE RIEGO DE LA CANCHA DE FÚTBOL

Según el registro que lleva el departamento financiero, el cual se encarga de administrar y pagar los servicios básicos, se tienen los siguientes datos para el consumo de agua realizado en el periodo de diciembre 17 del 2018 hasta enero 17 del 2019, para el medidor de agua colocado en la zona del complejo deportivo, el cual se encarga de controlar el consumo de agua del gimnasio de profesores, el complejo polideportivo y parterre central:

Tabla 1. Datos referenciales para el cálculo de costo de agua potable por metro cúbico

			A	B	C	D	A+B+C+D
m ³ de lectura anterior del medidor	m ³ de lectura nueva del medidor	m ³ consumidos al mes	Costo por pagar por agua solamente	Tasa de alcantarillado	Valor CEM	Tasa fija por diámetro de tubería	Total de Costos
5630.03	6605.67	975.64	\$570.00	\$456.00	\$16.47	\$60.08	\$1,102.55

Autor: De la O Frank.

Ahora dividiendo el costo total obtenido para el número de m³ consumidos se tiene el costo del agua potable por metro cubico:

$$\text{Costo agua potable} = \frac{\text{Total de costo de agua}}{\text{Numero de m}^3 \text{ consumidos al mes}} = \frac{\$1,102.55}{975.64 \text{ m}^3} = \$ 1.13/\text{m}^3$$

Si se considera el requerimiento de agua anual que requiere la cancha, se obtiene el costo que se genera por concepto de uso de agua potable por año.

$$\text{Costo de agua potable por año} = \text{Costo de agua potable} * \text{demanda anual}$$

$$\text{Costo de agua potable por año} = \frac{\$1.13}{\text{m}^3} * 690 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} * 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}} = \$ 9356.40/\text{año}$$

Si realizamos el mismo cálculo para el valor por metro cúbico de agua tratada obtenemos el costo anual de agua tratada.

*Costo de agua tratada por año = Costo de agua potable * demanda anual*

$$\text{Costo de agua tratada por año} = \frac{\$0.85}{m^3} * 690 \frac{m^3}{mes} * 12 \frac{meses}{año} = \$ 7,038.00/año$$

El resumen de costos y los tiempos de recuperación de la inversión se evidencian en la siguiente tabla.

Tabla 2. Resumen de costos de inversión y tiempo de recuperación

	ITEM	VALOR
A	Costo de agua tratada por año	\$7,038.00
B	Costo de agua potable por año	\$9,356.40
C= B-A	Ahorro monetario por uso de agua tratada por año	\$2,318.40
D	Inversión por proyecto	\$4,236.69
E= D/C	Años de recuperación de inversión	1.8
Ahorro monetario año 1		\$0.00
Ahorro monetario año 2		\$400.11
Ahorro monetario año 3		\$2,318.40
Ahorro monetario año 4		\$2,318.40

Autor: De la O Frank.



Figura 1. Ahorros por concepto de uso de aguas tratadas para labores de riego durante los primeros 4 años.

Autor: De la O Frank.

Tabla 3. Resultados obtenidos en el análisis de calidad del agua residual tratada en el núcleo de ingeniería. (Álava, 2018)

Identificación		Efluente PTAR Ingenierías
Fecha Muestreo		15/08/2018
Hora de Muestreo		14:08
Parámetro (Unidades)	Método	Resultado
Dureza total mgCO ₃ Ca/l	PEE-GQM-FQ-26	71
Sólidos Suspendidos Totales mg/l	PEE-GQM-FQ-06	2
Nitrógeno total mg/l	PEE-GQM-FQ-64	42,00
Orto Fosfatos mg/l	PEE-GQM-FQ-11	13,30
Sulfatos mg/l	PEE-GQM-FQ-28	34,00
Sodio mg/l	3120 B	56,35
Potencial de Hidrógeno, in situ -	PEE-GQM-FQ-41	7,03
Demanda Bioquímica de Oxígeno mgO ₂ /l	PEE-GQM-FQ-05	14,73
Coliformes Totales NMP/100ml	PEE-GQM-MB-38	> 241970