

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

**Diseño y construcción de un sistema de recirculación y recalentamiento de
agua para instalaciones sanitarias domésticas**

Santiago Hidalgo Pallares

Tesis de Grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Quito, Octubre de 2010

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Diseño y construcción de un sistema de recirculación y recalentamiento de agua para
instalaciones sanitarias domésticas**

Santiago Hidalgo Pallares

Pedro Meneses, MDI

Director de Tesis

Laurent Sass, Ph.D

Miembro del Comité de Tesis

Edison Bonifaz, Ph.D

Miembro del Comité de Tesis

Fernando Romo, M.Sc.

Decano del Colegio de Ciencias e Ingeniería

Quito, Octubre de 2010

© Derechos de Autor

Santiago Hidalgo Pallares

2010

Agradecimientos

A mis padres, cuyo esfuerzo realizado para formarme como persona y darme una educación de calidad a lo largo de mi vida, trascendió cualquier tipo de límites comprensibles, lo que me llevó a ser el hombre que soy en la actualidad. A mis hermanos, quienes siempre estuvieron interesados y preocupados en conocer el avance de este proyecto. A mis compañeros y profesores, cuya guía y apoyo fue fundamental de inicio a fin. Finalmente a Dios, de quien he recibido siempre el alimento espiritual que garantiza mi estabilidad emocional incluso en los momentos más duros. Gracias a todos por esta meta cumplida.

Resumen

La irresponsabilidad del ser humano en todo lo que respecta al medio ambiente y al trato hacia este planeta ha traído consecuencias nada alentadoras en las últimas décadas y las repercusiones nos afectarán sin duda en el futuro, cercano y lejano. Por esta razón se ha realizado un proyecto de grado que apoya al desarrollo sostenible de la ciencia, y que de alguna manera puede crear conciencia en la sociedad sobre el adecuado manejo de los recursos naturales.

Esta tesis entregará al lector una reseña muy detallada de lo que consiste el diseño y construcción de un sistema de recirculación y recalentamiento de agua para instalaciones sanitarias domésticas. En palabras más simples: se ha buscado desarrollar un producto que realice la recirculación del agua ocupada en las duchas de los hogares, mediante un conjunto de bomba y tuberías, para generar un importante ahorro del recurso, manteniendo el confort deseado por lo usuarios, recalentando el agua con la utilización de resistencias eléctricas dispuestas en un tanque y entregarla a la temperatura requerida.

A lo largo del trabajo, se ha procurado explicar cada paso con máxima claridad, de modo que su comprensión no se limite a estudiantes o profesores afines a carreras técnicas, sino que el tema del mismo pueda ser de interés general. Uno a uno los capítulos se entrelazarán, pasando por la concepción inicial de la idea, la evolución de alternativas previas, el diseño preliminar, el diseño crítico, los modelos 3D definitivos y, finalmente, los resultados obtenidos tanto en el mencionado trabajo efectuado como en el prototipo construido, para corroborar la validez de esta tesis de grado.

Abstract

The irresponsibility of human beings according all aspects related to the environment and the treatment of this planet has brought nothing but terrible consequences in the recent decades and the effects will certainly affect us in the future. For this reason this graduation project has been performed, in order to support the sustainable development of science, which can somehow raise awareness in society about the appropriate management of natural resources.

This thesis will provide the reader a very detailed review about the design and construction of a water recirculation and reheating system for domestic sanitary installations. In simpler words: this project wants to develop a product that performs recirculation of water in the showers, using a set of pump and piping, to generate a significant resource saving while maintaining the comfort desired by users, overheating water with the use of electrical resistors arranged in a tank and delivering it at the required temperature.

Throughout the work, an explanation of every step with utmost clarity has been sought, so that their understanding will not be limited for faculty related students and professors, but the issue itself may be of general interest. One by one the chapters are intertwined, from the initial conception of the idea, the evolution of previous alternatives, preliminary design review, critical design review, the definitive 3D models, and finally, the results obtained in the work performed, as well as in the prototype building procedure, to verify the worthiness of this thesis.

Índice de contenidos

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Introducción y objetivos del proyecto.....	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Justificación e importancia del proyecto.....	6
1.4 Área de influencia del proyecto.....	7
1.5 Proyectos similares existentes.....	7
Capítulo 2: Marco Teórico.....	10
2.1 Fundamentos de la Mecánica de Fluidos.....	10
2.1.1 Flujo de fluidos en tuberías.....	11
2.1.2 Cabeza de presión.....	13
2.2 Fundamentos de la Turbo maquinaria.....	14
2.2.1 Bombas Centrífugas.....	15
2.2.2 Bombas Sumergibles.....	17
2.2.3 Selección de bombas.....	18
2.2.4 Diseño de Bombas Centrífugas.....	23
2.3 Fundamentos de la Transferencia de Calor.....	24
2.3.1 Conducción de calor en serpentines eléctricos.....	25
2.4 Método de los Elementos Finitos (FEM).....	25
2.5 Sistemas de automatización.....	28
2.5.1 Motores DC y AC.....	28
2.5.2 Cableado eléctrico.....	30
2.5.3 Contactos manuales.....	31
2.5.4 Contactos automáticos.....	31
2.5.5 Circuitos eléctricos básicos de control.....	32

Capítulo 3: Desarrollo de la solución.....	34
3.1 Obtención de datos experimentales.....	34
3.2 Documento de Requerimientos Técnicos (TRD).....	37
3.3 Prototipos previos y Análisis FODA de cada alternativa.....	39
3.4 Identificación de componentes críticos.....	44
3.5 Revisión del Diseño Preliminar (PDR).....	47
3.6 Materiales.....	50
3.7 Revisión del Diseño Crítico (CDR).....	51
3.7.1 Diseño Hidráulico.....	51
3.7.2 Diseño Crítico de la Bomba Centrífuga.....	58
3.7.3 Diseño de Transferencia de Calor del Tanque Calentador.....	68
3.8 Modelos 3D Paramétricos.....	74
3.9 Reportes de Pruebas Técnicas.....	79
3.10 Planes de Mantenimiento.....	82
Capítulo 4: Conclusión.....	84
4.1 Resumen de actividades.....	84
4.2 Análisis del resultado final.....	87
4.3 Conclusiones.....	89
4.4 Recomendaciones.....	91
Capítulo 5: Bibliografía.....	94
Capítulo 6: Anexos.....	96

Índice de Figuras

Figura 1: Referencias de consumo de agua, Quench Showers.....	8
Figura 2: Descripción de instalación del sistema de Quench Showers.....	9
Figura 3: Alternativa previa desechada.....	40
Figura 4: Alternativa escogida para continuar con el Diseño Preliminar.....	41
Figura 5: Diseño Preliminar del sistema en vista isométrica.....	48
Figura 6: Acercamiento Parte Superior del Diseño Preliminar del sistema.....	49
Figura 7: Acercamiento Parte Inferior del Diseño Preliminar del sistema.....	50
Figura 8: Gráfico de Estado Transitorio del sistema de recalentamiento.....	72
Figura 9: Modelo 3D Paramétrico del tanque calentador.....	73
Figura 10: Modelo 3D Paramétrico del sistema de tuberías y unión T.....	74
Figura 11: Construcción del disco del impeller de la bomba centrífuga.....	75
Figura 12: Construcción del alabe de la bomba centrífuga.....	75
Figura 13: Vista Superior del impeller de la bomba centrífuga.....	76
Figura 14: Vista Frontal del impeller de la bomba centrífuga.....	76
Figura 15: Vista Isométrica del impeller de la bomba centrífuga.....	77

Índice de Tablas

Tabla 1: Datos estadísticos de duchas en Quito y sus alrededores.....	35
Tabla 2: Análisis FODA de alternativas previas al Diseño Preliminar.....	42
Tabla 3: Cálculos de Longitud Total de los álabes.....	63

1. Introducción

1.1 Introducción y objetivos del proyecto

Es de conocimiento de todos que el planeta Tierra no está pasando por su mejor momento. El imparable derrame de crudo en el Golfo de México, las continuas discusiones sobre la emisión de CO₂ a la atmósfera y muchos otros acontecimientos cotidianos, son únicamente ejemplos de lo que la negligencia humana ha logrado en las últimas décadas: dejar de herencia para las generaciones venideras, un hogar cada vez más maltratado y en peor estado.

Es por esta razón que me he decidido a realizar un proyecto de grado que en alguna medida apoye e impulse la sustentabilidad de la utilización de energías y recursos disponibles en la Tierra. Pienso que cada ser humano debería aportar con lo mínimo, por lo menos, a la conservación del medio ambiente, para pasar de ser una parte del problema a ser una parte de la solución. Sin duda alguna, un granito de arena de parte de cada uno de nosotros puede conllevar a un resultado impresionante y de magnitudes inimaginables.

El trabajo que será ilustrado en este documento de tesis de grado, contiene absolutamente toda la metodología que se ha llevado a cabo para desembocar en el resultado final del proyecto: un sistema de recirculación y recalentamiento de agua para instalaciones sanitarias domésticas.

A medida que se avance en los capítulos, se encontrará tanto el marco teórico utilizado para el diseño, como las aptitudes y los conocimientos profesionales que se han adquirido a lo

largo de la carrera de Ingeniería Mecánica, para lograr concretar dicho diseño en un prototipo funcional de calidad, que cumple con los parámetros y especificaciones técnicas aprobados en la iniciación del proyecto.

Un sistema de recirculación y recalentamiento de agua para duchas, consiste principalmente en un circuito de tuberías y serpentines calentadores que reciben agua propulsada por una bomba centrífuga desde el desagüe hasta el tope de la instalación sanitaria. Los objetivos del proyecto en sí, son el de reducir al mínimo el tiempo de espera hasta que salga agua caliente por la boquilla, y el de activar la recirculación de agua al momento que el usuario haya finalizado la utilización de jabón o champú y pueda continuar su baño con la misma agua. En los dos casos el ahorro de este recurso tan importante para nosotros es increíble.

Como objetivos del trabajo de tesis, están principalmente el de diseñar el mencionado sistema de recirculación y recalentamiento basándose en estándares internacionales de hidráulica y turbo maquinaria, y el de construir un prototipo funcional de calidad y a bajos costos que demuestre el concepto del sistema, de modo que pueda ser implementado directamente en instalaciones existentes, con el mínimo impacto hacia las mismas. Además de dichos objetivos, el proyecto contiene varios retos académicos para el responsable del mismo, como son varios estudios de factibilidad y de comparación de costos tomando en cuenta diferentes escenarios de producción y uso, y el diseño mecánico profundizado de una bomba centrífuga, destinada a la implementación original e innovadora del producto.

1.2 Antecedentes

Los recursos hídricos en el Ecuador

El Ecuador es un país con una superficie aproximada de 256.000 km², y afortunadamente cuenta con una de las reservas de agua dulce más importantes del mundo, por número de habitantes. Sin disponer enormes cuerpos de agua como los Grandes Lagos en Norteamérica o gigantescos ríos que crucen el territorio nacional, los ecuatorianos difícilmente tendremos problemas de escasez en un futuro cercano. Lamentablemente no se avizora lo mismo para las generaciones venideras, especialmente para aquellas asentadas en comunidades sin cuencas abundantes en sus cercanías.

“Los Recursos Hídricos de la República del Ecuador están sujetos a una presión que es una función de la demanda del agua para satisfacer las múltiples necesidades que dependen de ella y de la desigual distribución del agua tanto en el espacio como en el tiempo. Muchas instituciones públicas y privadas nacionales tienen que ver con este cada vez más escaso recurso natural, lo cual perjudica su racional accionar al momento de servir a las comunidades y habitantes asentados dentro de sus fronteras, los cuales en muchos de los casos, comparten y litigan con fronteras naturales, políticas y administrativas.

La conservación, el manejo adecuado y sustentable del agua es particularmente importante en el país, pues las desigualdades de riqueza potencial entre diferentes cuencas y entre los diferentes actores sociales están estrechamente vinculadas al acceso al agua; adicionalmente, el 70% de la energía eléctrica en el Ecuador es de origen hidráulico.”(Galarraga) [1]

Tal como menciona el Dr. Ing. Remigio Galarraga en su artículo, el agua, así como prácticamente todos los recursos naturales presentes en el territorio ecuatoriano, son abundantes pero pesimamente distribuidos. En la minoría más rica de la población se concentran no solo las fuentes abundantes de mejor calidad, sino también el consumo desmedido y el despilfarro en actividades totalmente evitables. Aunque hay que mencionar también, que el famoso juego con agua en los días del feriado de Carnaval en nuestro país, causa una profunda herida en las reservas y la producción de cada año, y esta mala costumbre se encuentra radicada en toda clase social del pueblo ecuatoriano.

De igual manera, el Dr. Ing. Remigio Galarraga, de acuerdo a datos científicos asegura lo siguiente: “Para mantener los ritmos actuales de desperdicio y de consumo, se requiere una producción de alrededor de 320 lt/hab/día. De mantenerse esa tasa de consumo y la cobertura del servicio de agua estimada para 1995 hasta el fin de siglo, la producción de agua potable necesaria para el año 2000 será de aproximadamente 72 millones de m³/mes. La racionalización del consumo y disminución de las pérdidas, de modo de poder disminuir la producción a un valor razonable de 250 lt/hab-día, permitiría que con el mismo volumen de agua se pueda incrementar la cobertura de 57% a 74%; esta parece ser la tendencia, pues las fuentes más económicas y abundantes ya se han explotado.”(Galarraga) [1]

Esto resulta incomprensible e inadmisibles, considerando que en el Ecuador, hace una década, menos del 40% de los hogares tenían acceso a agua potable, haciendo énfasis en las zonas rurales, las cuales no cuentan ni con agua de calidad ni con alcantarillado. Incluso en algunas provincias, indicadas en el mismo artículo de Galarraga, Esmeraldas, Napo y Guayas,

la cobertura de la demanda de agua potable no alcanza ni siquiera el 50% en zonas urbanas, no se diga en las zonas rurales.

De la misma manera enfatiza en su artículo, Alexandra Ávila de diario El Universo, el tema que estamos tratando y que considera un gran problema para todos los gobiernos que han pasado por el país. La cuarta parte de las reservas mundiales de agua dulce se encuentra en la Amazonia sudamericana, sin embargo existe escasez en casi la mitad de la población debido a la mala administración del recurso. Ávila puntualiza varios ejemplos de falta de agua potable en comunidades de las provincias de Loja, Santa Elena, Manabí y muchas zonas altas de la Sierra. Podemos ahora nosotros hacer un énfasis aparte en el deficiente sistema legislativo del Ecuador a lo largo de toda su historia, ya que el artículo del diario El Universo fue publicado a mediados del 2009, cuando la nueva Ley de Aguas estaba entrando en debate, y hasta la fecha (casi un año después) dicha Ley sigue sin ser aprobada, lo que causa una incertidumbre que puede llevar a la desesperación y a la peor utilización del recurso, peor de lo que se ha venido haciendo hasta ahora. [2]

Un nuevo artículo publicado por la agencia de noticias Europa Press señala las diferencias abismales que existen entre el consumo medio de agua por habitante y el consumo recomendado por la Organización Mundial de la Salud. Como mencionamos anteriormente, cada persona promedio consume alrededor de 300 litros de agua diarios, cuando con un manejo responsable del recurso, esta magnitud podría ser reducida a 80 litros diarios, sin embargo las campañas de concienciación llegan a cuenta gotas y generalmente sólo en países desarrollados. [3]

Según el artículo, impulsado por la fundación Natura-Medio Ambiental, el consumo de agua de un ser humano incluye aseo personal y necesidades vitales (17% del consumo total), agricultura y ganadería (75%) e industria (8%). [3] Lamentablemente el manejo irresponsable se puede encontrar en cualquiera de estos ámbitos y no solo en el del consumo personal. Sin embargo, y como se mencionó en la introducción de este documento, el proyecto trata de colaborar en la medida de lo posible con el ahorro del agua en nuestro país, y aseguramos que este granito de arena, aportado por la mayoría de la población, puede resultar un respiro sumamente reconfortante para el planeta Tierra.

1.3 Justificación e importancia del proyecto

Tal como se ha mencionado, el tema del reciclaje, el ahorro de energía o la mera conciencia ecológica en el Ecuador es prácticamente inexistente, por lo que el medio ambiente y la sociedad en general sufren de la saturación de desechos, la escasez de agua para regadíos y las crisis energéticas.

Es increíble ver cómo en países europeos la gente ha logrado adaptarse a un estilo de vida mucho más austero en cuanto al consumo y desperdicio de recursos naturales y fuentes de energía. Por esta razón estoy totalmente convencido de que el beneficio que podría obtener la sociedad ecuatoriana, gracias a la implementación de este proyecto, llegaría a ser invaluable para el futuro de nuestro país.

Desde el punto de vista académico, el proyecto consistiría de un sistema global integrando el campo de la turbo maquinaria, la hidráulica, la transferencia de calor, el diseño

mecánico, los elementos finitos y aplicaciones básicas de circuitos eléctricos y sistemas de control.

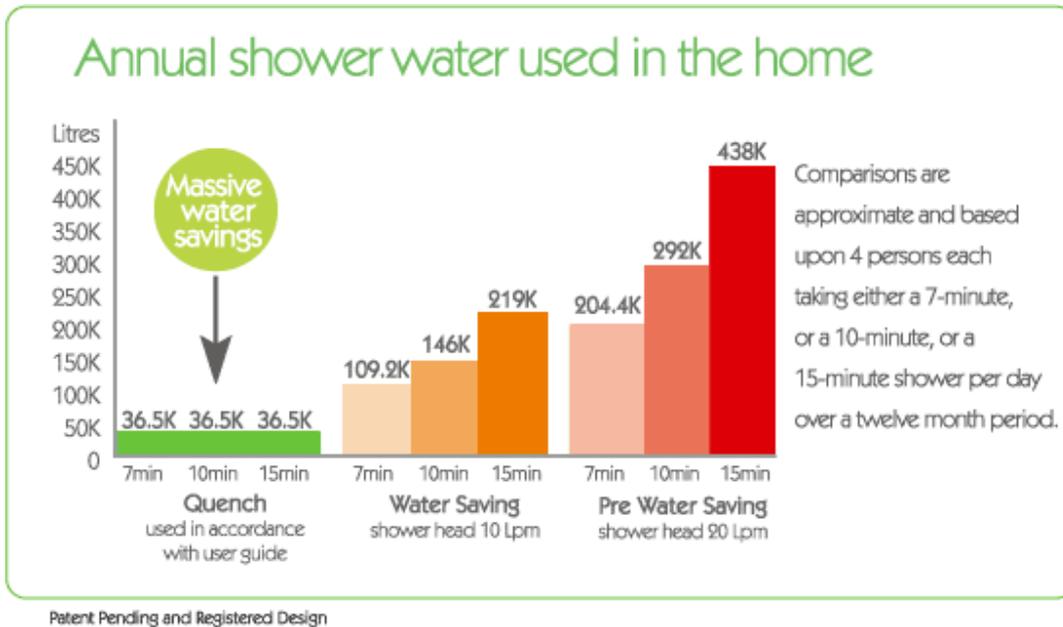
Debido a todas estas razones, la importancia del desarrollo de un proyecto como éste no entraría en duda. En la culminación contaríamos con un producto realmente necesario para el ahorro de cualquier hogar ecuatoriano, y sobre todo, con un sistema amigable con el medio ambiente que permita augurar un futuro un poco más alentador para el planeta Tierra.

1.4 Área de influencia del proyecto

Sociedad ecuatoriana en general, por la implementación de un sistema que colabora en gran medida con la sustentabilidad del confort humano en relación con la conservación del medio ambiente y la conciencia ecológica.

1.5 Proyectos similares existentes

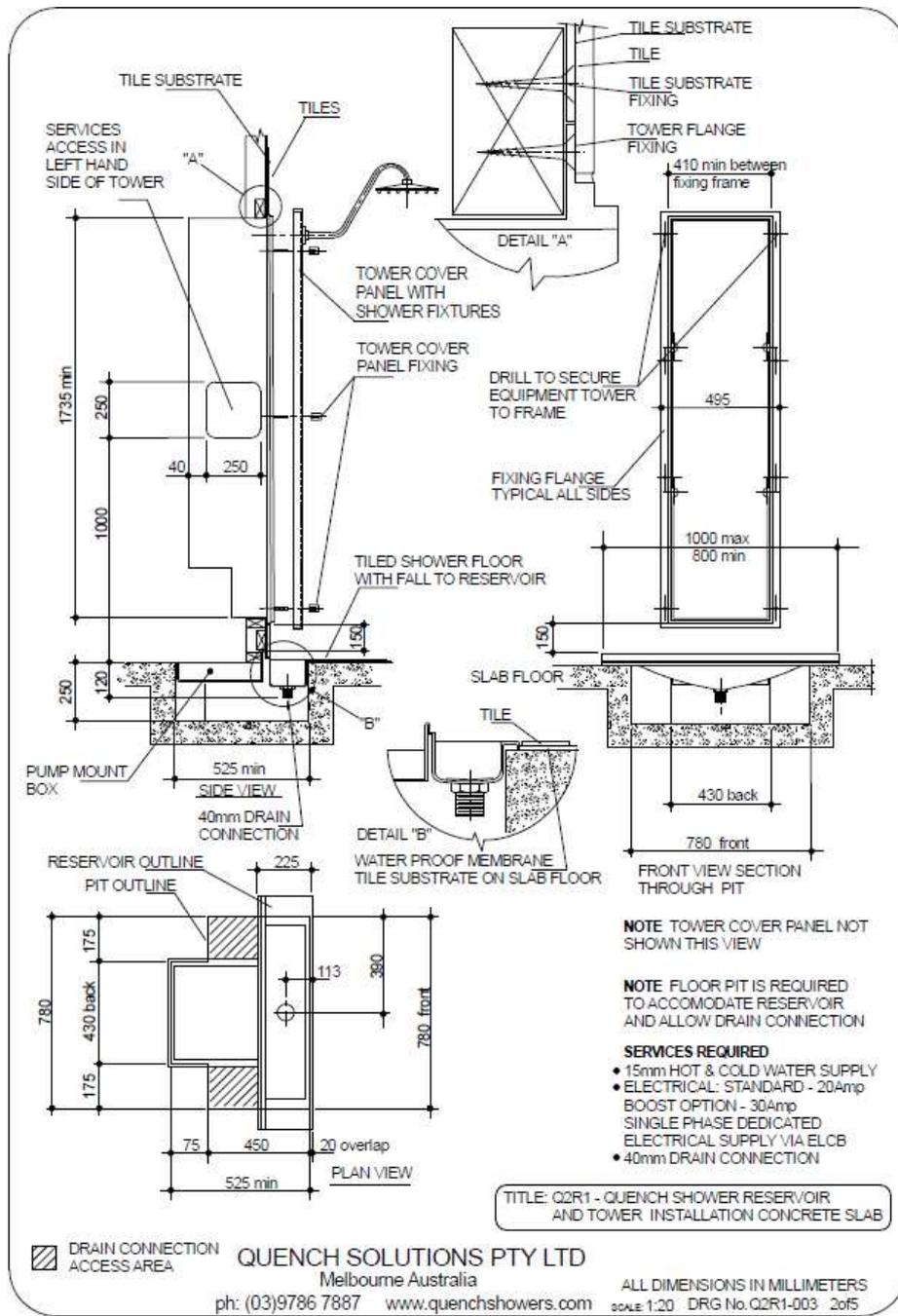
La empresa australiana de Quench Showers, tiene varios años en la industria fabricando un sistema de recirculación y recalentamiento de agua. Este ha sido el único producto al que nuestro proyecto se asemejaría. Sin embargo, ellos manufacturan y comercializan la ducha entera con el sistema incluido, es decir, está destinado principalmente para construcciones nuevas y es poco adaptable a baños y estructuras ya existentes. A continuación se presenta un gráfico puesto a disponibilidad del público por Quench Showers, en el que se ilustran las cifras de ahorro de agua que se llega a obtener con la compra de las instalaciones sanitarias fabricadas por la empresa:



[4]

Figura 1. Referencias de consumo de agua, Quench Showers.

De igual manera, se presentan varias ilustraciones de los planos de instalación de QuenchShowers, sobre la disposición de la bomba recirculante, de modo que se entienda de qué forma se reserva el agua que va a ser bombeada nuevamente a la boquilla/descarga superior de la ducha, mediante desagües adicionales y tuberías conectadas entre el desagüe existente y el circuito de recirculación.



[4]

Figura 2. Descripción de instalación del sistema de Quench Showers.

2. Marco teórico

2.1 Fundamentos de la Mecánica de Fluidos

El principio fundamental de la Mecánica de Fluidos es justamente el estudio del comportamiento de un fluido tanto en movimiento como en reposo y en diferentes tipos de ambientes y condiciones en las que se encuentre.

Un fluido es un material que se deforma fácilmente, mediante bajas fuerzas de corte o de tensión. En general cualquier material en estado líquido o gaseoso es considerado un fluido.

Dentro de esta materia se toman en cuenta varias magnitudes físicas para realizar el estudio mecánico correspondiente para el fluido en cuestión: presión, temperatura, densidad (absoluta y relativa), peso específico y viscosidad. A continuación se incluirá una definición breve de cada una de las magnitudes nombradas.

Presión (P): es la fuerza de compresión de un fluido en estado estático; al existir movimiento, la presión es la variable más dinámica o cambiante en los fluidos.

Unidad Internacional: atm (atmosfera), Pa (Pascal). $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$.

Unidad Inglesa: psi (libra por pulgada cuadrada). $1 \text{ atm} = 14.696 \text{ psi}$.

Temperatura (T): es la propiedad del fluido que está relacionada con la energía interna del mismo. Suele considerarse constante para flujos de baja velocidad, pero para flujos de velocidades altas varía significativamente.

Unidad Internacional: K (Kelvin), °C (Grado Celsius). $K = °C + 273$.

Unidad Inglesa: R (Rankine), °F (Grado Fahrenheit). $R = °F + 459.69$. $1 R = 1.8 K$

Densidad absoluta (ρ): la densidad de un fluido está dada por el resultado de dividir su masa sobre la unidad de volumen. En los gases es sumamente cambiante, sin embargo en los líquidos es prácticamente constante.

Unidad Internacional: kg/m^3

Unidad Inglesa: slug/ft^3

Densidad Relativa (ρ): es la comparación cuantitativa de un fluido cualquiera con la densidad estándar del agua dulce a 4 °C (1 kg/ m^3).

Peso específico (γ): a diferencia de la densidad, el peso específico resulta de la división del peso terrestre sobre la unidad de volumen. Peso específico del agua dulce a 4 °C = 9800 N/m^3 .

Unidad Internacional: N/ m^3 .

Unidad Inglesa: lbf/ft^3 .

Viscosidad (μ): es la propiedad que describe la fluidez de un líquido, es decir, la viscosidad cuantifica la resistencia del mismo a fluir.

Unidad Internacional: $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$.

Unidad Inglesa: $\text{lbf}\cdot\text{s/ft}^2$. [9]

2.1.1 Flujo de fluidos en tuberías

Cuando un fluido recorre la longitud de una tubería, ya sea doméstica o en la ciudad, el fluido se ve afectado por varios aspectos entre los cuales los tres más importantes son: efectos de inercia y viscosidad del fluido en sí (número de Reynolds), la fricción con las paredes de la tubería y las vibraciones a las cuales puede estar sometida la misma.

Por lo tanto, al momento de seleccionar una tubería adecuada (dimensiones y material) para el transporte de un fluido determinado, se debe tomar en cuenta estos tres aspectos para reducir al mínimo las probabilidades de falla del ducto.

Las herramientas que se tienen para sobrellevar estas dificultades son principalmente el número de Reynolds y el coeficiente de fricción de Manning.

El primero se lo obtiene mediante la siguiente expresión matemática, descubierta por

$$\text{Osbourne Reynold: } Re = \frac{\rho \cdot \bar{v} \cdot Di}{\mu}$$

\bar{v} = velocidad promedio del flujo

ρ = densidad del fluido

Di = diámetro interior de la tubería

μ = viscosidad del fluido

El siguiente es un conjunto de coeficientes determinados experimentalmente por Manning, que relacionan la magnitud de la fricción existente entre diferentes tipos de fluidos

y de materiales de tuberías. Estos coeficientes se encuentran tabulados en varios textos de Mecánica de Fluidos y de Hidráulica.

Lo que se busca principalmente, es que el fluido que se encuentre viajando a lo largo de la tubería, sufra la menor cantidad de interrupciones posibles durante su recorrido. Por lo tanto, en la Mecánica de Fluidos se hace especial énfasis en la diferencia que existe entre un flujo laminar y un flujo turbulento.

Para fluidos no viscosos, como el agua dulce, se han establecido convenciones para que los ingenieros realicen aproximaciones y agiliten su trabajo. El número de Reynolds definido para que el flujo sea laminar debe ser igual o menor a 2100, mientras que el flujo turbulento se ha definido por un número de Reynolds igual o mayor a 4000. Los valores intermedios entre los dos números mencionados se utilizan para describir a los llamados flujos en transición. [9] [11]

2.1.2 Cabeza de presión

A partir de la 1era Ley de la Termodinámica, se puede extraer una aplicación directa en la Mecánica de Fluidos, de modo que se pueda definir más sencillamente la denominada Altura de Cabeza o Cabeza de Presión.

Este término es conocido por los ingenieros como la presión dinámica que debe tener un fluido para alcanzar una altura (en unidades de longitud, metros o pulgadas) definida. Como un ejemplo sumamente claro y simple, un edificio de 30 metros de altura, tiene una Altura de Cabeza de 30 metros más los factores de seguridad que hayan sido determinados.

Por lo tanto, la presión que debe alcanzar la bomba colocada en la boca de la cisterna de dicho edificio, tiene que ser suficiente para impulsar al fluido a la Cabeza de Presión definida anteriormente.

La Mecánica de Fluidos ha llegado a una expresión matemática para describir en términos cuantitativos la Cabeza de Presión o Altura de Cabeza, y la misma es ilustrada a continuación:

$$H = \frac{P}{\rho \cdot g_c}$$
, siendo H la altura en unidades de longitud que alcanzaría un fluido con

densidad ρ y con gravedad específica g_c si se encuentra a una presión P.

Más adelante se expondrán de igual manera las ecuaciones y expresiones matemáticas que se han ido desarrollando con el progreso de la materia de la Turbo maquinaria, de modo que se explique cómo calculan los ingenieros los parámetros de diseño que utilizan en ambientes totalmente prácticos. [8][9]

2.2 Fundamentos de la Turbo maquinaria

La Turbo maquinaria es el campo de la Ingeniería Mecánica que estudia el comportamiento de los fluidos en movimientos, así como los dos tipos principales de turbo máquinas: bombas y turbinas.

Las Turbo Máquinas son máquinas rotativas que permiten una transferencia de energía entre un rotor provisto de álabes y un fluido. Una turbina recibe la energía de un fluido en

movimiento para así generar energía mecánica en sus alabes y provocar el giro del rotor. Una bomba, mientras tanto, hace girar su rotor por medio de energía eléctrica o térmica, e impulsa un fluido estático o semi-estático hacia un movimiento continuo.

Para competencia de este trabajo de tesis de grado, las turbinas no son de nuestro interés, por lo que nos concentraremos en explicar el funcionamiento de las bombas, especialmente dos tipos de ellas, que serán consideradas al momento de analizar el diseño más adecuado para el sistema a desarrollar: bombas centrífugas y bombas sumergibles. [12]

2.2.1 Bombas Centrífugas

La bomba centrífuga es la turbo máquina más utilizada en la industria actualmente. Su funcionamiento se basa en convertir la energía mecánica de su impeller (impulsor o rodete) en energía hidráulica del fluido. Este tipo de bombas cuenta con una succión de flujo axial y descarga de flujo radial, es decir, al recorrer la geometría de los álabes, el fluido ve alterado su curso de manera brusca, sin embargo, el correcto diseño de una bomba centrífuga evita que se den turbulencias o cavitación excesiva dentro de su carcasa.

Los componentes que conforman una bomba centrífuga son los que detalla a continuación Pedro Fernández Díez:

“a) Una tubería de aspiración, que concluye prácticamente en la brida de aspiración.

b) *El impulsor o rodete*, formado por un conjunto de álabes que pueden adoptar diversas formas, según la misión a que vaya a ser destinada la bomba, los cuales giran dentro de una carcasa circular.

El rodete es accionado por un motor y va unido solidariamente al eje, siendo la parte móvil de la bomba.

El líquido penetra axialmente por la tubería de aspiración hasta la entrada del rodete, experimentando un cambio de dirección más o menos brusco, pasando a radial, (en las centrífugas), o permaneciendo axial, (en las axiales), acelerándose y absorbiendo un trabajo.

Los álabes del rodete someten a las partículas de líquido a un movimiento de rotación muy rápido, siendo proyectadas hacia el exterior por la fuerza centrífuga, creando una altura dinámica de forma que abandonan el rodete hacia la voluta a gran velocidad, aumentando también su presión en el impulsor según la distancia al eje. La elevación del líquido se produce por la reacción entre éste y el rodete sometido al movimiento de rotación.

c) *La voluta* es un órgano fijo que está dispuesta en forma de caracol alrededor del rodete, a su salida, de tal manera que la separación entre ella y el rodete es mínima en la parte superior, y va aumentando hasta que las partículas líquidas se encuentran frente a la abertura de impulsión.

Su misión es la de recoger el líquido que abandona el rodete a gran velocidad, cambiar la dirección de su movimiento y encaminarle hacia la brida de impulsión de la bomba.

La voluta es también un transformador de energía, ya que frena la velocidad del líquido, transformando parte de la energía dinámica creada en el rodete en energía de presión,

que crece a medida que el espacio entre el rodete y la carcasa aumenta, presión que se suma a la alcanzada por el líquido en el rodete. En algunas bombas existe, a la salida del rodete, una *corona directriz de álabes* que guía el líquido antes de introducirlo en la voluta.

d) Una tubería de impulsión, instalada a la salida de la voluta, por la que el líquido es evacuado a la presión y velocidad creadas en la bomba.” (Diez) [5]

Las bombas centrífugas se pueden clasificar de varias formas, ya que existen algunas combinaciones de acuerdo a su disposición o características fundamentales. Pueden diferenciarse bombas según su tipo de impeller (impulsor o rodete), su tipo de carcasa o voluta, bombas de simple o doble succión, de una etapa o multietapas, eje de orientación horizontal o vertical y finalmente, disposición de la voluta o carcasa radial o axial. [12]

2.2.2 Bombas Sumergibles

Una bomba sumergible es una turbo máquina de flujo principalmente axial, que tiene como característica esencial un conjunto complejo de sellos mecánicos que evitan filtración del fluido hacia el motor de la bomba, de modo que la misma pueda sumergirse por completo en dicho fluido sin sufrir ningún daño. Adicionalmente, como ventaja primordial frente a otros tipos de bombas, la sumergible no se encuentra sometida a la presión de aire que exista en el medio ambiente, por lo que puede alcanzar alturas de cabeza significativamente más elevadas que las de otros tipos.

Se pueden mencionar dos aplicaciones principales de las bombas sumergibles. La primera es la colocación de este tipo de turbo maquinaria en depósitos de combustible o pozos de agua, ubicando la bomba en el fondo de los mismos. La segunda, y probablemente la más importante debido a la magnitud de la industria en la que se la utiliza, es la producción petrolera. Cuando un yacimiento de crudo ya no posee la presión natural suficiente como para que el fluido suba hasta la superficie por sí mismo, se realiza una evaluación que pondera la rentabilidad del pozo si se lo sigue explotando, o si conviene por el contrario, cerrarlo y explotar otro yacimiento. Si se llega a la conclusión de que se debe seguir explotando dicho yacimiento, se procede a descender bombas electro-sumergibles, generalmente de varias etapas (varios impulsores dispuestos en serie) para que bombeen el petróleo hasta la superficie. [6]

2.2.3 Selección de bombas

Por lo general, el trabajo de un ingeniero, especializado en hidráulica o campos afines, es el de realizar los cálculos y estudios pertinentes sobre un sistema en el que se vaya a instalar una determinada turbo máquina. Es entonces cuando el profesional determina todos los parámetros necesarios para cumplir con su labor y procede a la selección de materiales o componentes en general. Estos pueden ser: tuberías, codos, uniones rectas, uniones en T, válvulas y, finalmente, el componente que podría ser considerado el más importante y crítico en el diseño: la bomba adecuada para el producto final.

Existen muchas variables que nos asisten en el trabajo de selección de una bomba. Un ingeniero tiene que pensar en varios aspectos que regirán al sistema desde que es instalado hasta el fin de su vida útil, por lo que un error cometido en este paso del diseño sería simplemente catastrófico.

Sin duda, los parámetros más importantes que se toman en cuenta al momento de la selección son el caudal a utilizarse en el sistema y la altura de cabeza que debe ser vencida para obtener un resultado exitoso. Sin embargo, otros aspectos como la eficiencia de la bomba, que desemboca en la altura de cabeza real, el tipo de fluido con el que se va a trabajar y la potencia total requerida para la bomba, son sumamente importantes para la decisión final tomada por el ingeniero.

Una vez han sido calculadas o definidas cada una de estas variables, los ingenieros cuentan con la facilidad ofrecida por los fabricantes de bombas alrededor del mundo de llegar por medio de gráficas y tablas diseñadas por los mismos productores, a la bomba adecuada de acuerdo a las necesidades. De igual manera, instituciones reconocidas internacionalmente, como la ASME (American Society of Mechanical Engineers) o la IPC (International Plumbing Code) han hecho el trabajo de los ingenieros incluso más sencillo. Todo esto para evitar cualquier tipo de errores que puedan causar resultados desastrosos. Tablas, códigos, métodos de trabajo, referencias técnicas y un sinnúmero de ayudas adicionales, son siempre importantes para completar un trabajo serio y de calidad.

A continuación, se ilustrarán los parámetros y variables que hemos presentado, de manera técnica y específica, tomando en cuenta que es con estas expresiones con las que se trabajará a partir del siguiente capítulo de este documento de tesis, en el que se profundizará

tanto en el diseño y construcción del prototipo del sistema, como en el diseño mecánico de la bomba centrífuga.

- Caudal (Q): el caudal es la medida del volumen de fluido que recorre en la unidad de tiempo a través de una superficie definida.

$$Q = v \cdot A \quad Q = \frac{V}{t}$$

Unidades: L/s, L/min, Gal/s, GPM (galones por minuto).

- Altura de cabeza (Cabeza de presión) (Hi): como ya fue mencionado anteriormente, la altura de cabeza es la presión dinámica que debe tener un fluido para alcanzar una altura definida. En la Turbo Maquinaria se define a la altura de cabeza con la siguiente expresión.

$$Hi = \left(\frac{U_2}{g} \right) \left(U_2 - \frac{Q}{A_2 \tan \beta_{f2}} \right)$$

U_2 : es la velocidad tangencial del impeller (impulsor o rodete) a la salida del fluido.

La gravedad g también se considera. De igual manera el caudal Q que recorre por la bomba. A_2 : es el área de descarga, así como β_{f2} es el ángulo que existe entre las velocidades absoluta y relativa al impeller del fluido, a la descarga.

Cabe resaltar, que este cálculo se la altura de cabeza se lo realiza en los casos que no se conozca, y se necesite, dicha variable. Cuando se trata de una construcción, o instalación existente, se procede únicamente a medir la altura en cuestión, y en la

mayoría de casos, se la multiplica por un factor explicado más adelante, que da como resultado la llamada altura de cabeza real.

- Altura de cabeza real (Ha): Es la altura de cabeza que resulta después de considerar aspectos reales como las pérdidas de presión por fricción y la eficiencia hidráulica.

$$Ha = \eta_h \cdot \mu_s \left(\frac{U_2}{g} \right) \left(U_2 - \frac{Q}{A_2 \tan \beta_{f2}} \right)$$

η_h : llamado eficiencia hidráulica, es un factor que relaciona el caudal teórico calculado y el caudal real que entra y sale de la bomba.

$$\eta_h = 1 - \frac{0.8}{Q^{0.25}}$$

μ_s : es el factor de deslizamiento de las pérdidas de presión existentes en el recorrido del fluido a través de los álabes de la bomba.

Dos formas de calcular dicho factor de deslizamiento son las siguientes:

$$\mu_s = \frac{Vu_2}{Vu_2'}$$

que es la relación de las velocidades tangenciales, real e ideal del fluido a

la descarga, lo que es sumamente complicado de medir sin equipos especializados. Es por esto, que los ingenieros hidráulicos han obtenido una expresión para el factor de deslizamiento mucho más práctica:

$$\mu_s = 1 - \frac{\pi \cdot \sin \beta_{b2}}{z_b}$$

β_{b2} : ángulo de incidencia, es el ángulo que existe entre la línea de entrada del fluido al álabe y la tangente de éste último en el diámetro exterior del impeller.

z_b : es simplemente el número de álabes con el que cuenta el impeller de la bomba.

- Tipo de fluido a tratar: Este es un caso de diseño intuitivo, básicamente. Un ingeniero debe estar al tanto, y tener el conocimiento técnico suficiente, como para diferenciar entre fluidos newtonianos y no newtonianos, fluidos contaminados y pesados por la presencia de metales en su composición química, y muchos otros casos en los que una elección errónea de la bomba puede conllevar a un daño abrupto e irreparable de la misma.

Por ejemplo, al tomar en consideración un pozo petrolero a miles de metros bajo tierra, sería bastante lógico decidirse por una bomba electro sumergible y de varias etapas, que no sufra daños y que alcance importantes alturas. De igual modo, si se trabaja con agua caliente, no es necesaria una bomba sumergible, pero la disyuntiva nos lleva al tipo de tubería a utilizar, que debería ser metálica pero poco corrosible y que no corra el riesgo de derretirse o perder sus propiedades mecánicas con el calor excesivo, como el cobre.

- Potencia total de una bomba: difiere de la simple relación entre energía entregada por el eje del motor de la bomba en la unidad de tiempo. La potencia total abarca aspectos adicionales del rendimiento de una bomba en funcionamiento, como la potencia generada debido al rozamiento, la potencia hidráulica, y de la misma manera, se consideran las eficiencias mecánica e hidráulica para obtener un resultado más certero.

$$P_s = P_h + P_f + P_L + P_m + P_{df}$$

P_m : es la potencia debida al rozamiento de rodamientos y sellos. Es entregada por lo general por el fabricante.

P_{df} : es la potencia debida al rozamiento del impeller con el fluido o en casos extremos con la voluta. Es también entregada por el fabricante.

$$P_h = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H_a$$

$$P_f = \rho \cdot Q \cdot g(H_i - H_a)$$

$$P_L = \rho \cdot Q_L \cdot g \cdot H_i$$

Q_L : es conocida como la fuga de caudal en el impeller. [12][14]

2.2.4 Diseño de bombas

El procedimiento de diseño de una bomba no es del todo complicado, sin embargo, la vasta variedad que existe en la industria en la actualidad es sin duda un aliciente para los consumidores, pero un enorme desafío para el ingeniero o futuro profesional que busque una innovación en un tema tan estudiado.

El diseño de una bomba muchas veces se ve adherido a la información con la que cuenta el diseñador y a su experiencia en dicho campo. Si bien existen algunos puntos definidos para seguir paso a paso con el diseño, encontrados en el libro de William Peng de

Fundamentos de la Turbomaquinaria, el procedimiento no es en sí riguroso y puede tener modificaciones en su orden y sus métodos por quien lo vaya a poner en práctica.

William Peng nos indica seis etapas de diseño básicas, con las que se puede trabajar de manera eficiente y muy probablemente con buenos resultados. Después de haber obtenido toda la información necesaria para iniciar el diseño, es decir datos estadísticos o resultados experimentales, así como tablas y pruebas de bombas existentes, se procede a diagramar el diseño de la nueva turbo maquina con los siguientes pasos: el tipo de impeller, dimensiones de los álabes y tipo de flujo a obtener (radial, axial o mixto), configuración de la entrada (succión), configuración de la salida (descarga), el perfil efectivo geométrico de los álabes, forma y dimensiones del difusor y la voluta y, finalmente, la potencia requerida en la bomba para diseñar el eje y su acople con el impeller.

Por último, lo que se realiza con el mayor rigor posible para evitar dejar pasar cualquier tipo de fallas, son las prueba de rendimiento de la bomba. Estas pruebas pueden ser efectuadas en un laboratorio o directamente en campo, y una vez se han obtenido los resultados deseados, se concluye el diseño para realizar la entrega de la bomba y la instalación de la misma en las facilidades en las que sea requerida, siempre tomando en cuenta las especificaciones técnicas para las que fue fabricada.

El diseño profundo y exhaustivo de una bomba centrífuga será realizado para los fines de este trabajo de tesis, y sus detalles serán presentados en el tercer capítulo de este documento.

2.3 Fundamentos de la Transferencia de Calor

La Termodinámica es uno de los campos más extensos y de mayor aplicación práctica dentro de la Ingeniería Mecánica. Esta disciplina estudia los estados en equilibrio de la materia y se analizan interacciones de energía y de masa.

La Transferencia de Calor tiene una gran relación con la termodinámica, es más, se podría decir que es parte de la misma, sin embargo, las dos grandes diferencias entre estas materias, son: 1) la Transferencia de Calor nace a partir de los estados de la materia que no están en equilibrio, y 2) la Transferencia de Calor se enfoca en intercambios de energía, únicamente, y no de masa.

Los procesos básicos de la Transferencia de Calor son: conducción, convección (natural o forzada) y radiación. La primera consiste en la difusión de energía debido a movimiento molecular aleatorio, la segunda es similar mas la adición de movimiento macroscópico, y por último, la tercera es la transferencia de energía por ondas electromagnéticas. Esta disciplina de la ingeniería basa sus conceptos en el gradiente de temperatura presente en los procesos, y estudia las razones por los que se da esta diferencia de estado térmico y los resultados que se obtienen al variar las condiciones. [11]

2.3.1 Conducción de calor en serpentines eléctricos

La conducción de calor que se da en un serpentín calentador es igual a aquella que ocurre al momento de analizar cilindros o formas parecidas. La conductividad térmica k que

se tomaría en cuenta en este caso sería dependiente del material del que este fabricado el serpentín. De esta manera, el trabajo de los ingenieros sería el de calcular el flujo de calor existente entre el dispositivo eléctrico y el fluido en cuestión, en nuestro caso, el agua proveniente del desagüe de la ducha.

Una vez realizado este trabajo, se procede a seleccionar el tipo y tamaño de serpentín calentador más adecuado para el diseño, considerando como principales aspectos la potencia nominal y el costo del equipo. Este trabajo, como el resto del diseño, será detallado en el próximo capítulo del documento de tesis. [11]

2.4 Método de los Elementos Finitos (FEM)

Décadas atrás, cuando el Método de los Elementos Finitos aun no era inventado, los ingenieros debían encontrar diferentes formas de resolver los problemas, en el menor tiempo posible, sin embargo esta tarea resultaba sumamente complicada.

Básicamente, el trabajo del ingeniero consistía en analizar el sistema físico a estudiar. Se enfocaba en su configuración, el dimensionamiento de cada parte crítica y en los materiales de los cuales estaba fabricado el sistema. Acto seguido, se procedía a la construcción de un modelo matemático que lograra abarcar todas las complejidades del sistema, de modo que sea lo más cercano a la realidad posible. Generalmente, estos modelos consistían en Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (ODE) o en otros tipos de problemas de valores en la frontera. Como se mencionó antes, los resultados entregados con estos métodos

eran seguramente bastante satisfactorios, pero el tiempo que tomaba llegar a dichos resultados aceptables, era inmensamente largo, por lo que un avance en la ciencia era imprescindible.

Es así como se llega a la creación del Método de los Elementos Finitos. Esta disciplina de la ingeniería consta en la división finita del sistema físico en pequeños elementos (el número de elementos queda a discreción de quien resuelva el problema). Es decir, en lugar de analizar el sistema como un “todo”, se procede a dividirlo en varias partes (por lo general iguales, si se resuelve el problema manualmente) y el procedimiento debe ser repetido en varias ocasiones, las mismas que el número de elementos. Sin embargo, campos de las matemáticas como el álgebra lineal, entran a jugar roles determinantes en este método, ya que facilitan el trabajo del ingeniero sobremanera, al ahorrar estas innumerables repeticiones al condensar el problema en una gran matriz que puede ser resuelta con mayor agilidad. Ahora, lo que se debe mencionar enfáticamente acerca de este método, es que los resultados que arroja no son exactos. Debido a la división que se realiza, se depende de la precisión de dicha división, cosa que en muy pocos casos alcanza la exactitud. Por esta razón, es obvio añadir que al dividir el sistema en cuestión en más elementos, se obtendrán resultados más cercanos a la realidad. Debido a esto, la aproximación es más confiable a medida que el problema se vuelve más difícil de resolver.

Afortunadamente, el crecimiento sustancial e impresionantemente veloz de la tecnología ayudó absolutamente a todos los campos de la ciencia, entre ellos, lógicamente, a la ingeniería. Es por esto, que el contar con computadores cada vez más rápidos y de mayores capacidades de almacenamiento de memoria, fue clave para el diseño y comercialización de programas de resolución de problemas más y más avanzados. Entre estos “software”

ingenieriles, se pueden mencionar todos los paquetes de dibujo asistido por computador (CAD), así como los programas de análisis numérico.

Finalmente, y para competencia de este capítulo, se procedió a desarrollar un tipo de programa de computación que abarcara las dos clases de software anteriormente mencionados. Los de dibujo y diseño asistido y aquellos de resolución numérica de problemas se juntan para brindar a los ingenieros los ya famosos paquetes de Elementos Finitos, en los cuales se puede generar una geometría tridimensional y absolutamente pegada a la realidad del sistema que se desea estudiar. Tal como lo dicta la materia que se está presentando, dicho sistema puede ser dividido en el número de elementos que el usuario crea apropiado, para dejar al computador la tarea de resolver el problema una y otra vez hasta llegar a la aproximación del resultado deseada.

El desarrollo de este tipo de paquetes computacionales ha llegado a tal nivel, que la subrutina estructural es solo una de las opciones que puede elegir el usuario para trabajar. Actualmente existen programas bastante avanzados en los que se puede trabajar por separado o incluso integrar, subrutinas como las de mecánica de fluidos, transferencia de calor, estructuras de una, dos y tres dimensiones, termodinámica aplicada y un sinnúmero de opciones más. Es por esto, que el Método de los Elementos Finitos ha pasado a ser una materia crucial en la ingeniería, por lo que el diseño del sistema de recirculación y recalentamiento de agua, presentado en este documento de tesis, se verá fuertemente apoyado en esta disciplina, y su aplicación en el proyecto será descrita de manera profunda en el próximo capítulo. [15]

2.5 Sistemas de Automatización

Según la definición de Jon Stenerson, un sistema automático es un conjunto de equipos que trabajan de manera integrada con el objetivo de cumplir una tarea determinada o producir un bien, sin la intervención del ser humano.

Iniciando con sistemas de amplificación de la fuerza humana y pasando por la revolución industrial en el Reino Unido, el ingenio del ser humano ha llegado a niveles de desarrollo impresionantes que han desembocado en la creación de plantas de producción automáticas que funcionan por medio de sistemas de control numérico, sin la necesidad de un operador.

Cabe resaltar que nuestro sistema consistirá únicamente de un básico tablero de control que ayudará al usuario a manejar el equipo como desee, y a su gusto. Es por esta razón que este subcapítulo no deja de ser de nuestra incumbencia, ya que contaremos con equipos utilizados en la automatización de maquinaria, aunque no se trate directamente de un sistema automático o semiautomático. [13]

2.5.1 Motores DC y AC

Un motor es un tipo de actuador rotativo que transforma la energía eléctrica en energía mecánica. Es decir, es un productor de movimiento y/o esfuerzo por medio de la electricidad que recibe. Existen motores de corriente continua (DC) y corriente alterna (AC).

Los motores DC se dividen en tres categorías principales: con escobillas, sin escobillas y “paso a paso”. El concepto fundamental de los dos primeros es similar. El motor consta de un rotor con imanes de polaridades variables y un estator con un imán permanente. En el motor con escobillas la fuerza electromagnética se transmite físicamente por medio de la fricción de las escobillas ubicadas en el rotor, mientras que en el “brushless” se produce un campo que es el causante de la rotación del eje del motor, conectado al rotor. El motor DC paso a paso cambia su concepto de funcionamiento al intercambiar el imán permanente del estator al rotor, siendo el componente estático el que recibe pulsos de polaridad variable que causa el movimiento de los polos N y S del rotor. Los motores DC tienen como ventajas una eficaz controlabilidad y un buen rendimiento a altas velocidades, pero su constante fricción y desgaste, además del problema de recalentamiento que sufren, son sus mayores desventajas.

Los motores AC existen de dos tipos: monofásicos y trifásicos. En ambos casos, el rotor cuenta no con uno sino con varios imanes permanentes con polos salientes. El motor AC monofásico funciona de manera similar al DC, pero el giro constante se da únicamente a altas velocidades, ya que la naturaleza de la Corriente Alterna causa pequeños cambios de dirección que en altas velocidades son imperceptibles. La ventaja de este motor es de igual manera su controlabilidad y falta de desgaste por fricción. Sin embargo su principal desventaja es la baja potencia que alcanza a generar (alrededor de 1 HP). El motor trifásico por lo contrario, alcanza potencias mucho mayores (cerca de 50 HP), por lo que su aplicación industrial es vasta y propensa a grandes cargas. El funcionamiento de este motor consiste en el desfase natural existente en las señales de las tres fases de energía eléctrica. Este desfase presente en el estator causa el giro del rotor, provisto igualmente de imanes permanentes.

Sería importante recalcar que los motores cuya aplicación más común son las bombas y compresores con los motores AC monofásicos, por lo que estos serán considerados como primera opción al momento de elegir los componentes para nuestro prototipo. [13]

2.5.2 Cableado eléctrico

Al momento de realizar un cableado eléctrico, sin necesidad de transmitir datos de comunicación, la elección de materiales y demás componentes se facilita sobremanera. Sin embargo, también se debe tomar en cuenta las condiciones en las que se va a trabajar y en las que estará instalado el circuito.

Como solo se transportará potencia eléctrica, solo se incluye un tipo de cable. Pero se debe considerar la magnitud de dicha potencia y la longitud que debe tener el cable, para así elegir un diámetro apropiado. Adicionalmente, la calidad de la señal eléctrica que se va a recibir en el destino depende del material del cable, debido a su conductividad eléctrica, pero también existen otros aspectos. Como ejemplo: el oro es el metal de mayor conductividad, sin embargo, su elevado costo no justifica la utilización del mismo para una instalación sanitaria doméstica. [13]

2.5.3 Contactos manuales

Los contactos manuales que se pueden encontrar son los permanentes y no permanentes. Entre los permanentes resaltan los enchufes y fusibles. El interruptor y el pulsador son, por su parte, los contactos manuales no permanentes más utilizados.

La función de los contactos manuales es el de seleccionar y proteger a su vez a los componentes eléctricos o electrónicos que están conectados al circuito en cuestión. A su vez, pueden cumplir el rol de mando principal de encendido o apagado de un equipo. Se los llama manuales, justamente porque no dependen de ninguna otra interacción más que la humana para activarse y cerrar o abrir un circuito eléctrico. [13]

2.5.4 Contactos automáticos

Como su nombre lo indica, los contactos automáticos fueron creados para cerrar o abrir un circuito eléctrico sin la necesidad de una interacción directa del ser humano. Principalmente existen los contactores (electromagnéticos y neumáticos) y los relés (electromagnéticos y térmicos).

Los contactores tienen como función principal el accionar las piezas o componentes móviles de un sistema o equipo, como un motor. Consisten en contactos principales y auxiliares. Los principales van conectados directamente al circuito de potencia, es decir, a las entradas de energía de los equipos a accionar. Los auxiliares se conectan al circuito de control, es decir, de donde proviene la señal eléctrica o electrónica que indica cuándo se debe accionar los equipos móviles. Los contactores electromagnéticos, los más utilizados en la industria, funcionan como su nombre lo indica, en base a una fuerza electromagnética

inducida por la señal proveniente de los contactos auxiliares. Esta fuerza empuja un núcleo bobinado que a su vez cierra los contactos principales hasta que la señal del circuito de control desaparezca. Un contactor es construido con el afán de ser fácilmente reemplazado en el caso de daños, y a pesar de esto, tiene una textura muy robusta. La vida útil de los contactos de un contactor oscila entre las 100000 y 500000 operaciones, mientras que la vida útil del contactor en sí, supera estos valores unas 20 veces.

Por su parte, un relé es un dispositivo electromecánico, cuya característica principal es la de poder determinar el comportamiento en tiempo real de otro dispositivo. Las tres funciones que pueden encargarse a un relé son las de protección, mando y medición o regulación. Los relés en general son bastante similares a los contactores, sin embargo, la principal diferencia es la capacidad de corriente que tienen ambos dispositivos, siendo los contactos principales de un contactor, inexistentes en un relé. Es por esto que los relés son utilizados preferentemente en circuitos auxiliares de control, donde la corriente consumida es mucho más baja que en los circuitos de potencia. Las aplicaciones más comunes de los relés son las siguientes: amplificador de la capacidad de corriente, multiplicador de contactos, protector térmico y eléctrico, medidor de corriente o voltaje y temporizador. [13]

2.5.5 Circuitos eléctricos básicos de control

Los circuitos básicos de control se basan en el campo de la electrónica llamado control lógico. Esta ciencia se resume en conectar y manejar contactos normalmente abiertos y

normalmente cerrados, de manera lógica y con el conocimiento de la función del circuito, completamente dominado.

Los principales conceptos que se deben tener claros al realizar control lógico son los circuitos de fuerza o de potencia (uso de contactos principales) y los circuitos de control o de mando (uso de contactos auxiliares o también de relés). El alcance de automatización logrado con el uso de circuitos de control basados en la utilización de relés y contactores es completo, sin embargo en la actualidad, para aplicaciones industriales muy grandes se han reemplazado los cables físico por dispositivos electrónicos de cableado virtual, como el PLC (controlador lógico programable), con el afán de optimizar recursos y espacio. Para finalizar este capítulo, únicamente cabría mencionar que la realización de circuitos de control depende sobremanera de la habilidad y experiencia del ingeniero, para poder conectar cables, contactores y relés, a los equipos estáticos y móviles que deseen ser controlados, de modo que al activar la entrada de energía, el ser humano no se vea involucrado más en la operación del sistema. [13]

3. Desarrollo de la solución

3.1 Obtención de datos experimentales

Como se explicó anteriormente en el capítulo introductorio de este documento de tesis. El afán de obtener datos experimentales lo menos sesgados posibles nos llevó a visitar una importante cantidad de hogares quiteños, sin prejuicio de clases sociales o posición económica.

Lamentablemente, es necesario advertir que la buena intención no obtuvo un resultado de iguales características. Se conoció la cruda realidad ecuatoriana, especialmente en sus clases media-baja y baja. Los hogares que fueron objeto de nuestra visita contaban en su totalidad con duchas eléctricas, y carecían de cualquier tipo de calentamiento de agua centralizado, ya sea a gas licuado o eléctrico. Es por esto, que únicamente pudimos contar con los datos tomados durante las primeras visitas, como referencias validas para el desarrollo de nuestro proyecto. Las mencionadas visitas fueron llevadas a cabo en sectores de clases media-alta y alta de la ciudad de Quito, como: La Carolina, Monteserrín, Quito Tennis, Pinar Bajo, Pinar Alto y en las cercanías del valle de Cumbaya, en la urbanización de Miravalle 3.

El experimento realizado fue de gran facilidad y rapidez, aprendido en las clases de Laboratorio de Mecánica de Fluidos. Se procedió a adquirir un recipiente de sección transversal constante y de un tamaño apropiado para lo que se iba a hacer. Se midieron las dimensiones del recipiente con un “pie de rey”, para de esta forma calcular el volumen del mismo. Acto seguido y con la ayuda de un cronometro, se midió el tiempo en segundos en el que el recipiente se llenaba en su totalidad, en cada una de las duchas estudiadas, abiertas completamente, para de esta forma obtener el caudal máximo al que las mismas alcanzaban. De igual manera, con ayuda de un fluxómetro común y corriente, se midió la altura de cada

una de las duchas, tomando como punto de referencia cero “0” el desagüe inferior, y el tope o el punto de altura máxima a la boquilla de descarga principal de la ducha.

Los resultados obtenidos, tanto de las dimensiones del recipiente utilizado, como de las duchas son ilustrados a continuación:

Dimensiones Recipiente:

Diámetro = 9,9 cm = 3,9 in

Altura = 11,3 cm = 4,45 in

$$V = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot h$$

$$V = 869,84\text{cm}^3 = 53,16\text{in}^3 = 0,87\text{L} = 0,23\text{gal}$$

Ducha	Altura (cm)	Altura (in)	Tiempos de llenado (s)			Caudales medio	
			t1	t2	t3	en L/min	en GPM
1	190	74.80315	5.89	5.38	5.51	9.330822	2.4554796
2	196	77.165354	5.04	4.99	5.12	10.33473	2.7196665
3	198	77.952756	4.07	5.11	4.06	11.82562	3.1120051
4	192	75.590551	4.8	5.31	4.42	10.77572	2.8357156
5	200	78.740157	4.57	4.26	4.85	11.44526	3.0119114
6	204	80.314961	5.21	5.38	5.6	9.670859	2.5449628
7	195	76.771654	5.73	5.7	5.93	9.019078	2.3734417

8	191	75.19685	5.32	5.14	5.06	10.08835	2.6548291
9	190	74.80315	4.62	4.57	4.15	11.73697	3.0886767
10	192	75.590551	4.98	4.02	4.32	11.75459	3.0933144
11	193	75.984252	4.02	4.06	4.12	12.8337	3.3772908
12	201	79.133858	4.28	4.14	4.27	12.33816	3.2468832
13	204	80.314961	4.56	4.59	4.12	11.79888	3.1049697
14	202	79.527559	4.76	4.9	4.68	10.91849	2.8732878
15	200	78.740157	6.29	6.67	6.33	8.116703	2.1359745
16	207	81.496063	7.16	7.37	7	7.272234	1.9137458
17	209	82.283465	6.98	7.24	7.03	7.368056	1.9389622
18	206	81.102362	4.65	4.43	4.91	11.19165	2.9451714
19	198	77.952756	5.25	5.12	5.35	9.96	2.6210526
20	212	83.464567	6.96	7.82	7.39	7.0623	1.8585001
21	200	78.740157	5.68	5.21	5.07	9.810226	2.5816383
22	202	79.527559	4.67	4.09	4.78	11.5636	3.0430537
23	201	79.133858	5.38	5.82	5.77	9.226352	2.4279875
24	205	80.708661	4.92	4.97	4.45	10.91849	2.8732878
25	203	79.92126	4.66	4.24	4.59	11.60646	3.0543326

Tabla 1. Datos estadísticos de duchas en Quito y sus alrededores.

La altura máxima medida fue de: 212 cm = 83,46 in.

Los caudales fueron los siguientes:

Caudal Medio	10.31869	2.7154456
	L / min	GPM

Con estos datos, llegamos a la conclusión de establecer como requerimientos técnicos mínimos para el diseño del sistema y la construcción del prototipo, una altura de alcance mínima de 212 cm = 83,46 in, y un caudal mínimo de 11,4 L/min = 3 GPM, cifra redondeada al medio calculado mediante los datos experimentales, y además, correspondiente a la recomendación del Handbook del International Plumbing Code (IPC). A partir de estos datos, complementados por el resto de requerimientos técnicos del proyecto, y presentados en el subcapítulo siguiente, se continuará con el diseño del sistema de recirculación y recalentamiento de agua, así como con el diseño mecánico de la bomba centrífuga.

3.2 TRD (Documento de Requerimientos Técnicos)

De acuerdo a los datos obtenidos en varios hogares ecuatorianos, durante los experimentos realizados en las últimas semanas y detallados anteriormente, se ha llegado a conformar un pequeño listado de requerimientos técnicos mínimos que el prototipo funcional del proyecto de tesis debería alcanzar.

A continuación, los datos numéricos y especificaciones técnicas que regirán la continuación del desarrollo del proyecto:

- El caudal de agua mínimo que debe alcanzar el prototipo, y el diseño del proyecto, en general, será de: **0,19 L/s = 11,4 L/min = 0,05 Gal/s = 3 GPM**

(referencia en el caudal mínimo para duchas impuesto por el IPC)

- La altura de cabeza mínima que debe alcanzar la bomba (tanto la del prototipo, como la del diseño mecánico en las simulaciones) será de: **212 cm = 2,12 m = 83,46 in**

(referencia en la máxima altura de duchas encontrada en la población de datos)

- La temperatura mínima a la que se deberá mantener el agua a lo largo del sistema de recirculación hasta salir al ambiente será de: **40°C = 104°F**. Esto quiere decir que el gradiente de temperatura cubierto por el tanque calentador será de **13 °C = 55.4 °F**, debido a la temperatura a la ha sido medida el agua al entrar al desagüe de **27 °C = 80.6 °F**.
- A pesar de que el umbral del dolor del sonido, es decir el número de decibeles máximo que el oído humano puede soportar es de 120 dB, el ruido emitido por el sistema no se acercará siquiera a esta magnitud. Se ha establecido el máximo en: **90 dB**
- Se pondrá un especial énfasis en la interacción del sistema con el usuario. El tablero de control se conformará por sencillos pulsadores que activen y desactiven tanto la bomba como el serpentín calentador.
- El costo total de los materiales utilizados para construir el prototipo del sistema no sobrepasará los **150 USD**
- El costo de agua potable en la ciudad de Quito es de 0.39 USD por metro cúbico de agua consumido. Según el estudio financiero que se realizó, se asentó el periodo medio de recuperación de la inversión, en caso de instalar el sistema en: **8 años**

- Finalmente, y como el requerimiento más importante que se impondrá al sistema es el de ocasionar el mínimo impacto a las construcciones existentes al momento de instalar el sistema en la ducha respectiva. Con impacto mínimo nos referimos a picar la menor cantidad de baldosa posible, y mantener la ducha en sí tal como se la encontró antes. Las tuberías que conducen el agua hasta la boquilla superior, serán posiblemente manipuladas y en algunos casos sustituidas si es necesario.

3.3 Prototipos previos y análisis FODA de cada alternativa

Tal como ha sido indicado en el subcapítulo anterior, las alternativas de diseño que se han tomado en consideración, han sido realizadas siempre teniendo en mente los requerimientos técnicos que se detallaron en el TRD. Sin embargo, es importante resaltar que es sumamente difícil el encontrar una alternativa que cumpla al cien por ciento con cada una de las especificaciones que se han impuesto, por lo que mediante el análisis FODA que se presentará a continuación, se llega al diseño que más se acerque a lo requerido. La principal consideración que se ha mantenido como requerimiento de diseño, es el impacto mínimo hacia construcciones existentes. De igual manera, una condición técnica que ha sido de suma importancia es que el sistema debe estar siempre lleno, es por esto que se debe colocar las tuberías con una conexión T con la ducha original. Así estará el agua presente siempre, por pura interacción de la gravedad, de esta manera se garantiza una succión eficiente de la bomba, y lo que es más importante, se evita bajo cualquier concepto el daño de las resistencias eléctricas del tanque calentador, las cuales se verían afectadas de inmediato al no contar con el agua como refrigerante.

A continuación se presenta una de las alternativas que fueron desechadas, antes de ilustrar nuestra elección para continuar con el diseño preliminar. Los gráficos de las alternativas fueron realizados en 2D, lo que muestra con suficiente claridad la idea del sistema, para dar paso al diseño preliminar en 3D en los subcapítulos posteriores.

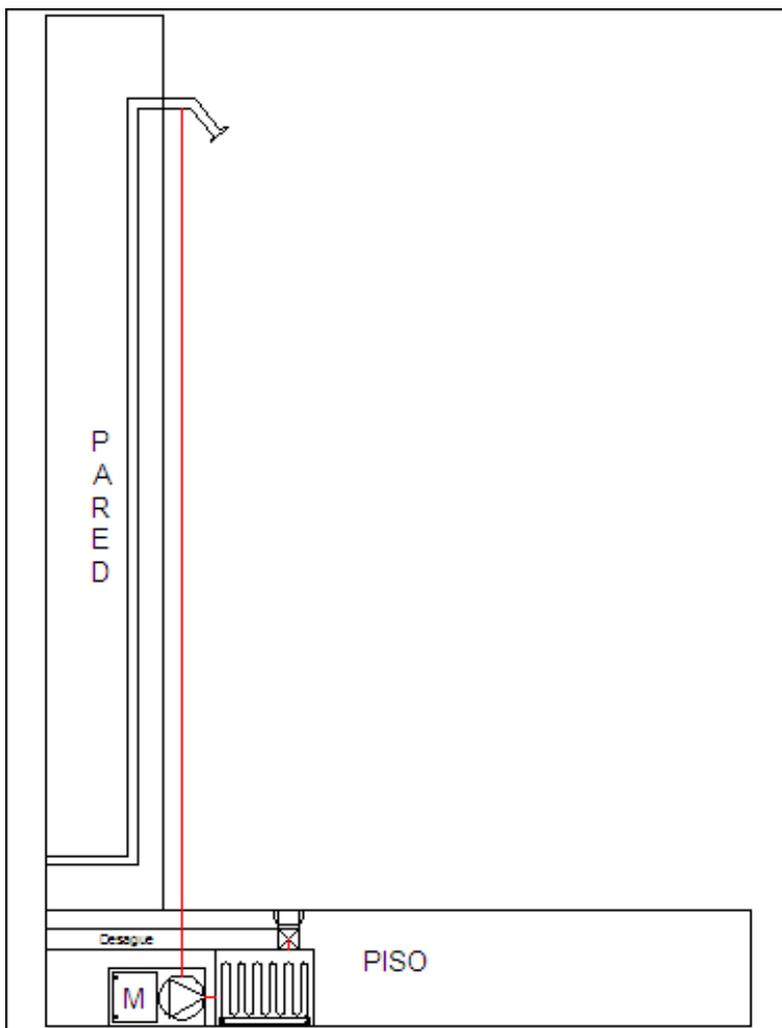


Figura 3. Alternativa Previa desechada.

En este gráfico se puede observar con claridad la ubicación del tanque calentador, de la bomba y de las tuberías del sistema de recirculación, ilustradas en color rojo, para su clara

apreciación. Como una breve descripción del funcionamiento de esta alternativa, se puede decir que el tanque funciona como acumulador a la vez que calienta el agua, y su entrada está conectada a una electroválvula de dos posiciones bi-estables, que envían el agua al desagüe o al tanque. Al nivel inferior, es decir, al fondo del tanque, se conecta la tubería que trasladará el agua hacia la bomba para iniciar con el bombeo nuevamente hacia la boquilla superior de la ducha.

Ahora se presenta la alternativa que fue elegida para continuar con el diseño preliminar.

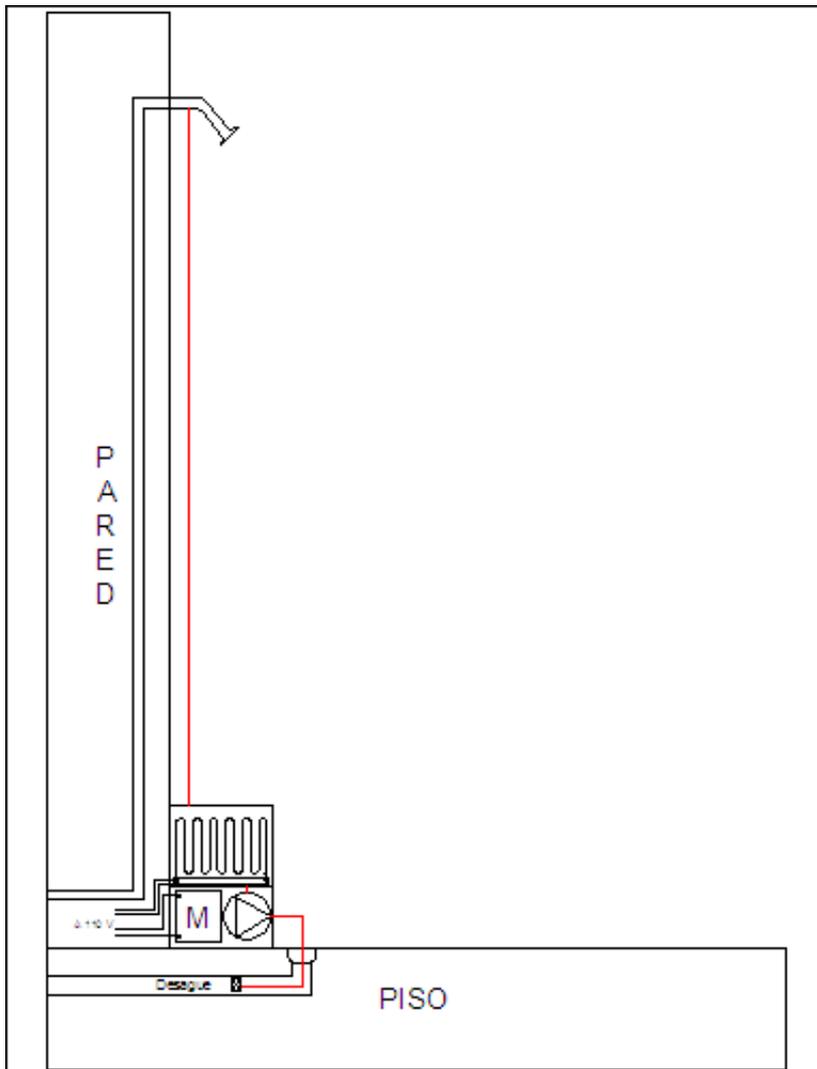


Figura 4. Alternativa escogida para continuar con Diseño Preliminar.

A diferencia de la alternativa anterior, en este caso, tanto el tanque como la bomba se encuentran en un nivel superior al del desagüe, y la única válvula que se utilizaría sería una simple válvula mecánica de anti retorno. Otra diferencia importante, es que el bombeo se lo efectúa antes que el recalentamiento del agua, y lo que es más claro de observar, es que el sistema compacto de bomba y tanque se ubicarían sobre el piso y no bajo el mismo.

Y ahora presentaremos el análisis FODA que se realizó entre las dos alternativas, para llegar a la elección final del gráfico que fue expuesto en segundo lugar. Este análisis se lo realizo de manera totalmente verbal y sin utilizar ponderaciones numéricas, lo que desde nuestro punto de vista facilita la comprensión del mismo por parte del lector.

<p style="text-align: center;">ALTERNATIVAS</p> <p>CRITERIOS</p>	<p>Alternativa 1</p>	<p>Alternativa 2</p>
<p>Fortalezas</p>	<p>Gran eficiencia de la linealidad entre calentador y bomba.</p>	<p>Impacto en construcciones existentes casi nulo al ubicar el sistema sobre el suelo.</p>
<p>Oportunidades</p>	<p>Posibilidad de reducir costos en cuanto al tamaño y potencia de la bomba utilizada, debido a la altura de cabeza y a las pérdidas de presión casi inexistentes.</p>	<p>Atractivo comercial muy grande, por el bajo impacto. Transferencia de calor más eficiente por la ubicación del calentador, posterior a la bomba.</p>
<p>Debilidades</p>	<p>Necesidad de picar la baldosa y el suelo para instalar el sistema.</p>	<p>Dependencia de aislamiento para evitar el contacto del agua con equipos eléctricos.</p>

Amenazas	Por lo general, el suelo está hecho de hormigón, lo que dificulta sobremanera la instalación del sistema.	Aumento de costos en materiales de aislamiento entre el sistema y el medio ambiente para evitar accidentes.
-----------------	---	---

Tabla 2. Análisis FODA de alternativas previas al Diseño Preliminar.

Si bien el análisis FODA es bastante elocuente, se podría realizar un pequeño aporte extra a las razones por las cuales se ha elegido el prototipo mencionado, en lugar del otro.

Como principal razón está el impacto a la construcción, cosa que fue resaltada en el TRD. Al momento de ubicar el sistema bajo el suelo, la instalación se vuelve sumamente difícil por la necesidad de picar en hormigón. En este caso, la alternativa elegida, también puede tener algún impacto, especialmente en duchas tipo tina, que no se encuentran directamente al nivel del suelo, sino que tienen forma elíptica y están sobre una porción extra de baldosa. Sin embargo, para instalar el sistema en estos ambientes, pues se necesita picar únicamente la pared de baldosa sobre la cual descansa la tina. Esta pared carece de hormigón, y es únicamente bloque, en la mayoría de construcciones, por lo que el impacto se mantiene mucho menor al ocasionado por la alternativa desechada.

El hecho de que la llegada del agua a recircular dependa netamente de la gravedad y la selección de la posición indicada de la electroválvula, facilita en gran manera el funcionamiento de la bomba, ya que una bomba centrífuga de magnitudes pequeñas no cuenta con la capacidad de succión en sistemas secos. En este aspecto, la alternativa desechada es la

adecuada. Sin embargo, al ubicar la tubería con la ayuda de una T entre la canalización original y la boquilla de salida, y dirigida directamente hacia el tanque y la bomba, asegura un sistema lleno de agua en todo momento, incluso antes de su activación o encendido. La válvula check, o de anti retorno, lo que hace justamente es evitar que el fluido salga al desagüe, pero permite que el fluido que cae de la regadera al desagüe sea succionado continuamente hacia el sistema. Esto, por lo tanto, nos soluciona el problema indicado.

Finalmente, la linealidad entre tanque y bomba es más eficiente en la alternativa desechada, pero las pérdidas ocasionadas por llenar el calentador luego de bombear no son comparables siquiera con la potencia efectiva de la bomba. Adicionalmente, al bombear el agua en un circuito cerrado, se mantiene un fluido presurizado, por lo que luego de llenarse el tanque, el agua recorrerá la tubería hasta la boquilla de salida, prácticamente con la misma velocidad y presión, por lo que no se sufre de disminución de caudal considerable. Basándonos en estos argumentos hemos llegado a nuestra decisión, para continuar así con nuestro diseño preliminar.

3.4 Identificación de componentes críticos

Al tener claro el funcionamiento del sistema, especialmente con la ayuda del gráfico presentado anteriormente, es bastante sencillo reconocer los componentes que serían críticos al momento de poner en marcha los equipos. Es importante remarcar que no todos los componentes del sistema son críticos, ya que el correcto funcionamiento del mismo, puede darse cuando los parámetros y características de algunos de ellos cambien o no estén del todo

bien calculados. No así en el caso de los componentes que sí sean considerados críticos, para los cuales la precisión en los cálculos y su excelente estado y propiedades mecánicas son de vital importancia para el desenvolvimiento de las partes en conjunto.

Primeramente, mencionaremos aquellos componentes a los cuales no consideramos críticos, con el fundamento argumentado para ello. En primer lugar se puede nombrar a las tuberías, cuyo diámetro nominal o material no es del todo decisivo. Esto se debe a que el caudal a llevar desde la bomba hacia la boquilla de la ducha no es significativamente grande, por lo que en una simple tubería de $\frac{1}{2}$ pulgada, dicho caudal circularía sin ningún problema. De igual manera sucede con el material, ya que las mismas tuberías de PVC u otros materiales plásticos similares resisten hasta más de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo menos $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ más que la temperatura a la que se encontraría el agua en nuestro sistema.

Como segundo componente podemos mencionar a la bomba. En los capítulos siguientes de este documento de tesis se profundizará acerca del diseño mecánico de una bomba centrífuga destinada a nuestro sistema. Pero en el prototipo funcional del mismo, no es para nada indispensable que la bomba a utilizar sea exactamente igual a la diseñada, es por esto que se procederá a adquirir una bomba de características los más cercanas posibles y simplemente adicionar una llave de paso para controlar su flujo. La altura de cabeza a superar y el caudal a transportar son relativamente pequeños, por lo que una simple bomba periférica de baja potencia y un costo realmente accesible, cumpliría fácilmente con los requerimientos establecidos. Es indispensable remarcar sin embargo, que la bomba centrífuga a diseñarse como uno de los objetivos principales del proyecto, es sin duda un componente crítico.

Ahora, entonces, vamos a proseguir identificando los componentes que también, se consideran críticos al momento de proceder con el diseño del sistema. La válvula de anti retorno ubicada al final de la tubería o manguera, dentro del desagüe de la ducha es un componente sumamente importante, y en el que se debe tener sumo cuidado al momento de seleccionar, así como el filtro de agua que debe tener como compañía. Al sufrir estos componentes cualquier tipo de obstrucción interna, el funcionamiento del sistema no sólo se vería detenido, sino que la integridad de la bomba, en especial, pasaría a estar en un gran riesgo, debido al inminente ambiente seco en el que empezaría a trabajar, o en su defecto, la presencia excesiva de impurezas en sus álabes.

Otro componente crítico que se debe mencionar es el tanque calentador, más precisamente, los termostatos o resistencias eléctricas ubicadas dentro del mismo. El diseño de la transferencia de calor que debe existir entre el serpentín metálico y el agua acumulada en el tanque debe ser muy preciso. En el momento en el que este falle, los requerimientos técnicos que se han establecido para el sistema no habrán sido cumplidos en lo absoluto, y el atractivo comercial del producto se verá afectado totalmente.

Por último, y como el componente crítico más importante que se puede nombrar en este subcapítulo, es la carcasa o cobertor del sistema. Como ya se mencionó anteriormente, tanto el calentador como la bomba cuentan con bornes eléctricos que deben ser conectados a la toma de 110 V más cercana disponible en el baño del cliente. Para evitar al 100% contacto directo entre el agua de la ducha y los equipos mencionados, la carcasa debe ser diseñada y manufacturada con sumo cuidado, ya que esto puede llegar a ser un enorme riesgo para el usuario. Debido a estos argumentos, se prestará especial atención al diseño de estos tres

componentes críticos que han sido identificados, de modo que la integridad del usuario en primer lugar, y del sistema, se vean completamente resguardados por una ingeniería responsable.

3.5 PDR (Revisión del Diseño Preliminar)

A partir de la alternativa escogida para continuar con nuestro diseño, y con los datos técnicos mínimos requeridos para cumplir con nuestras metas, hemos proseguido a realizar nuestro diseño preliminar básico, antes de entrar en cálculos detallados para la parametrización exacta del sistema.

Lo que se ha hecho principalmente es modelar un sistema de recirculación y recalentamiento en la herramienta de Auto CAD con las características de la alternativa ganadora en el análisis FODA. De igual manera se busco asegurar en este diseño preliminar el cumplimiento de un requerimiento técnico en especial. Se trata del cumplimiento de la generación de un sistema adaptable a construcciones existentes por lo que el producto debería tener un mínimo impacto sobre las instalaciones.

De igual manera se ha tomado en cuenta una remarcación especial, que es justamente el generar un modelo bien planificado con la intención de que la revisión del diseño crítico (subcapítulo siguiente) no altere al presentado a continuación en gran medida, sino únicamente en detalles de dimensiones y magnitudes físicas en general.

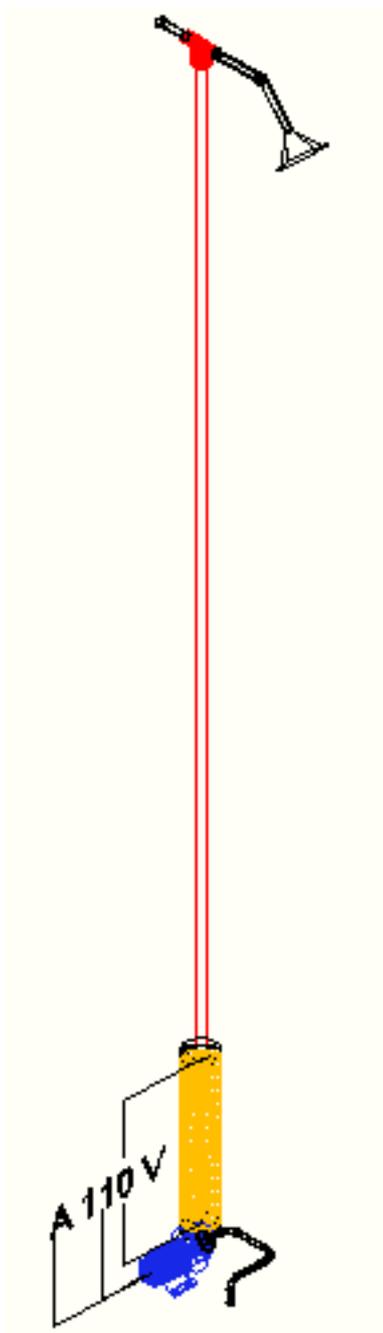


Figura 5. Diseño Preliminar del sistema en vista isométrica.

En las siguientes ilustraciones, se muestran acercamientos de la manguera de succión, la bomba, el tanque calentador y el inicio de la tubería, en la primera imagen, mientras que en

la segunda se puede observar la continuación de la tubería que desemboca en una conexión T con la boquilla de la ducha. Cabe resaltar que por tratarse del diseño preliminar, estos gráficos no cuentan todavía con dimensiones exactas de los componentes, las cuales serán determinadas en los cálculos detallados en el subcapítulo de Revisión de Diseño Crítico.

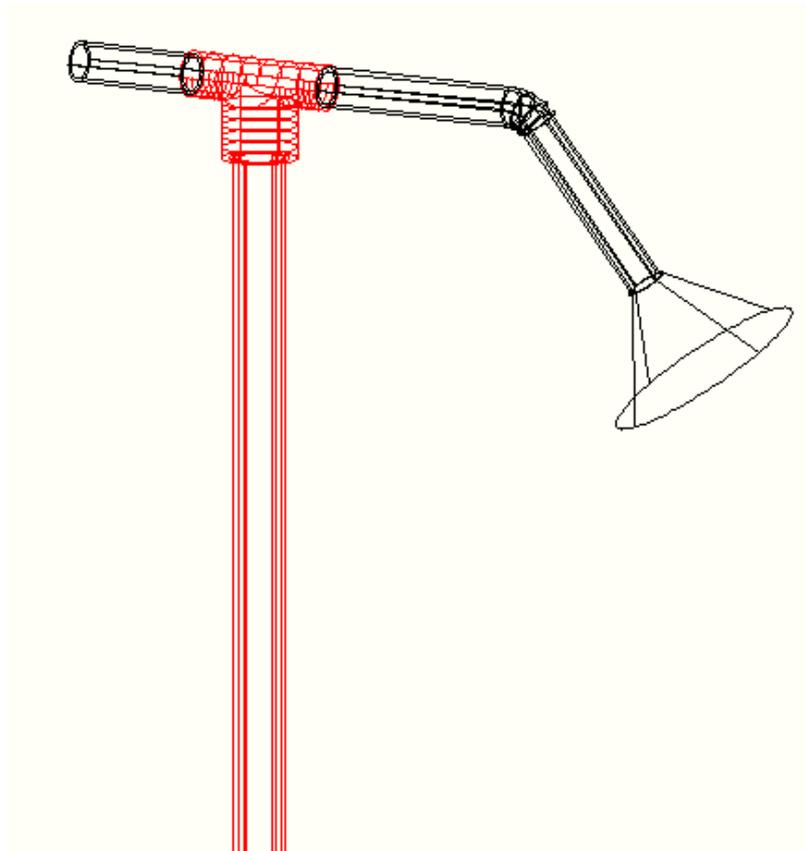


Figura 6. Acercamiento Parte Superior del Diseño Preliminar del sistema.

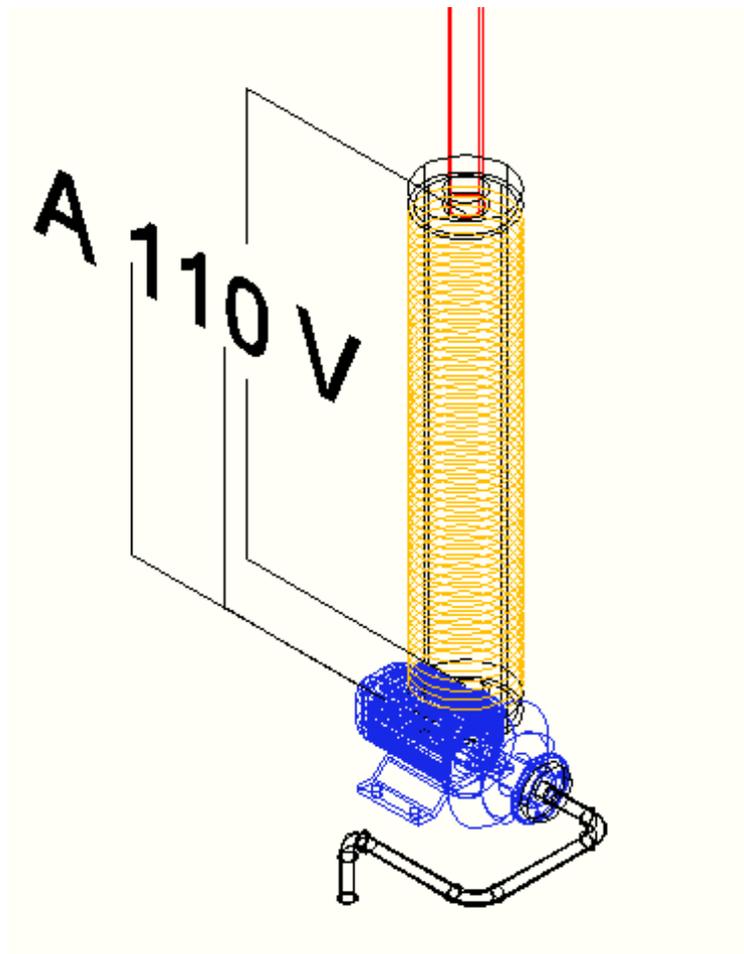


Figura 7. Acercamiento Parte Inferior del Diseño Preliminar del sistema.

3.6 Materiales

En el diseño preliminar que hemos presentado en el subcapítulo anterior se pueden observar los componentes que conformarán nuestro sistema. En esta sección vamos a detallar los materiales con los que se fabricarán estos componentes, o el material de aquellos equipos que se seleccionarán, tanto para el diseño como para la construcción del prototipo funcional.

- Las tuberías y la unión T a utilizar serán fabricadas de Polivinilo de Cloruro (PVC) o de Polietileno puro (Línea Cuatritubo de Plastigama).
- El tanque calentador que a su vez funcionará como carcasa aislante del serpentín eléctrico será fabricado de Plexiglás o de acrílico.
- El serpentín por su parte será fabricado de dos materiales posibles que cuentan con una resistividad eléctrica bastante similar (relativamente alta, para que el calor se concentre al resistir el paso de la corriente), Nicromo o Inconel X-750.
- La bomba centrífuga a diseñar tendrá nuevamente al PVC como su materia prima, mientras que la utilizada para el prototipo será de aleación de aluminio o de un acero con bajo contenido de carbono, debido a la limitada dureza que se requiere.
- Los cables eléctricos para conducir la corriente desde la toma más cerca de 110 V hasta los bornes de la bomba y del serpentín serán de cobre.
- Se puede utilizar sencillamente un segmento de manguera plástica de jardín para succionar el agua desde el fondo del desagüe hacia la bomba.
- Por último, tanto la válvula de anti retorno como el filtro de agua se escogerán de acero y plástico respectivamente, y se procurará no escatimar en calidad en ambos componentes.

3.7 CDR (Revisión del Diseño Crítico)

3.7.1 Diseño Hidráulico

Para el cálculo del sistema hidráulico, se ha considerado un flujo de agua a 40 °C, que fluye por una tubería de diámetro D, de longitud L, y que puede ser tanto laminar como turbulento. Como antecedentes de este cálculo, hemos conocido de boca de expertos en el tema, que el flujo dentro de una tubería de ducha, es por lo general turbulento, por lo que esperamos los mismos resultados en nuestro diseño.

A continuación presentamos en detalle, cada uno de los cálculos y asunciones de diseño que hemos realizado para determinar los parámetros de nuestro sistema hidráulico.

$$\text{Caudal requerido: } Q = 3GPM = 1.9 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

$$\text{Densidad del agua a } 40 \text{ °C: } \rho = 992.2 \frac{kg}{m^3}$$

$$\text{Viscosidad del agua a } 40 \text{ °C: } \mu = 0.000653 \frac{kg}{m \cdot s}$$

- Velocidad Media y Número de Reynolds para tubería de D = ½ in:

$$\bar{V} = \frac{Q}{A} = \frac{1.9 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{\pi \cdot \frac{(0.0127m)^2}{4}} = 1.5 \frac{m}{s}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{V} \cdot D}{\mu} = \frac{992.2 \frac{kg}{m^3} \cdot 1.5 \frac{m}{s} \cdot 0.0127m}{0.000653 \frac{kg}{m \cdot s}} = 28945.5$$

- Velocidad Media y Número de Reynolds para tubería de D = ¾ in:

$$\bar{V} = \frac{Q}{A} = \frac{1.9 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{\pi \cdot \frac{(0.01905m)^2}{4}} = 0.667 \frac{m}{s}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{V} \cdot D}{\mu} = \frac{992.2 \frac{kg}{m^3} \cdot 0.667 \frac{m}{s} \cdot 0.01905m}{0.000653 \frac{kg}{m \cdot s}} = 19306.65$$

- Velocidad Media y Número de Reynolds para tubería de D = 1 in:

$$\bar{V} = \frac{Q}{A} = \frac{1.9 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{\pi \cdot \frac{(0.0254m)^2}{4}} = 0.375 \frac{m}{s}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{V} \cdot D}{\mu} = \frac{992.2 \frac{kg}{m^3} \cdot 0.375 \frac{m}{s} \cdot 0.0254m}{0.000653 \frac{kg}{m \cdot s}} = 14472.75$$

Por medio de la ecuación de Darcy-Wiesbach procederemos a determinar las pérdidas de carga que se dieran al momento de poner en marcha el sistema, debido al rozamiento existente entre fluido y tubería. Para garantizar la precisión de esta expresión matemática, se necesita contar con el factor f, cuyo cálculo se realizará mediante la ecuación de Blasius. De igual manera, calcularemos las pérdidas suscitadas por presencia de codos o uniones entre tuberías.

- Pérdida de Carga en tubería de D = ½ in:

$$f = 0.3164 \cdot Re^{-0.25} = 0.3164 \cdot (28945.5)^{-0.25}$$

$$f = 0.02426$$

$$h_1 = 0.0826 \cdot f \cdot \left(\frac{Q^2}{D^5} \right) \cdot L$$

$$h_1 = 0.0826 \cdot 0.02426 \cdot \left(\frac{(1.9 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s})^2}{(0.0127m)^5} \right) \cdot 2.12m$$

$$h_1 = 0.4642m = 46.42cm$$

$$h_2 = K \cdot \left(\frac{V^2}{2 \cdot g} \right) = 0.90 \cdot \left(\frac{(1.5 \frac{m}{s})^2}{2 \cdot 9.8 \frac{m}{s^2}} \right)$$

$$h_2 = 0.1033m = 10.33cm$$

$$h_T = h_1 + h_2 = 0.5675m = 56.75cm$$

- Pérdida de Carga en tubería de $D = \frac{3}{4}$ in:

$$f = 0.3164 \cdot \text{Re}^{-0.25} = 0.3164 \cdot (19306.65)^{-0.25}$$

$$f = 0.02684$$

$$h_1 = 0.0826 \cdot f \cdot \left(\frac{Q^2}{D^5} \right) \cdot L$$

$$h_1 = 0.0826 \cdot 0.02684 \cdot \left(\frac{(1.9 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s})^2}{(0.01905m)^5} \right) \cdot 2.12m$$

$$h_1 = 0.0676m = 6.76cm$$

$$h_2 = K \cdot \left(\frac{V^2}{2 \cdot g} \right) = 0.90 \cdot \left(\frac{\left(0.667 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 9.8 \frac{m}{s^2}} \right)$$

$$h_2 = 0.0204m = 2.04cm$$

$$h_T = h_1 + h_2 = 0.088m = 8.8cm$$

- Pérdida de Carga en tubería de $D = 1$ in:

$$f = 0.3164 \cdot \text{Re}^{-0.25} = 0.3164 \cdot (14472.75)^{-0.25}$$

$$f = 0.0288$$

$$h_1 = 0.0826 \cdot f \cdot \left(\frac{Q^2}{D^5} \right) \cdot L$$

$$h_1 = 0.0826 \cdot 0.0288 \cdot \left(\frac{\left(1.9 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}\right)^2}{(0.0254m)^5} \right) \cdot 2.12m$$

$$h_1 = 0.0172m = 1.72cm$$

$$h_2 = K \cdot \left(\frac{V^2}{2 \cdot g} \right) = 0.90 \cdot \left(\frac{\left(0.375 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 9.8 \frac{m}{s^2}} \right)$$

$$h_2 = 0.00646m = 0.646cm$$

$$h_T = h_1 + h_2 = 0.0237m = 2.37cm$$

Tras observar los resultados obtenidos de tipo de flujo y de pérdidas de carga de cada uno de los diámetros de tubería, hemos llegado a las siguientes conclusiones:

- El flujo de agua caliente a lo largo de una tubería de ducha, es en efecto, en la mayoría de los casos (o siempre) turbulento, debido a la alta velocidad a la que se desplaza y el relativamente angosto camino que posee para desplazarse.
- La magnitud de turbulencia ($Re = 28945.5$) y de pérdidas ($h_T = 0.5675 \text{ m} = 56.75 \text{ cm} = 22.34 \text{ in}$) que se darían al utilizar la tubería de $\frac{1}{2}$ pulgadas de diámetro, nos obliga a descartar automáticamente esta posibilidad.
- Finalmente, al analizar las diferencias de turbulencia (Re de $\frac{3}{4} \text{ in} = 19306.65$ y Re de $1 \text{ in} = 14472.75$) y de pérdidas (h_T de $\frac{3}{4} \text{ in} = 8.8 \text{ cm}$ y h_T de $1 \text{ in} = 2.37 \text{ cm}$), así como la diferencia de precio entre las tuberías (12,85 USD/6 m por la de $\frac{3}{4} \text{ in}$ y 20,14 USD/6 m por la de 1 in), nos lleva a la decisión final de utilizar para nuestro sistema, tuberías Plastigama de Polietileno de $D = \frac{3}{4} \text{ in}$, debido a la baja diferencia de rendimiento de ambas y a la alta diferencia de costos.

Ahora, tras haber escogido el diámetro nominal interno de la tubería a utilizarse, y conociendo ya las pérdidas de carga que se presentarán dentro de la misma por la fricción del agua, procederemos a calcular las pérdidas de carga que también se darán a lugar en el resto del sistema, principalmente en el filtro de agua y en los cambios de sección transversal del tanque calentador.

En primer lugar, consideraremos el filtro que puede ser utilizado en el diseño del sistema. Hemos elegido un filtro de malla de acero inoxidable, cuyas características se presentan a continuación:

- Diámetro nominal = $\frac{3}{4} \text{ in}$ (concéntrico a la tubería)

- # de mesh = 825,5 por pulgada lineal
- Total de orificios = 619

Por lo tanto, continuamos calculando el caudal de un orificio, la velocidad de un orificio, el coeficiente K de un orificio, la pérdida de carga de un orificio y finalmente, la pérdida de carga total de los 619 orificios del filtro.

$$Q_{ori} = \frac{Q_T}{N_{ori}} = \frac{1.9 \times 10^{-4} m^3 / s}{619} = 3.06 \times 10^{-7} \frac{m^3}{s}$$

$$V_{ori} = \frac{Q_{ori}}{A_{ori}} = \frac{3.06 \times 10^{-7} m^3 / s}{4.58 \times 10^{-7} m^2} = 0.667 \frac{m}{s}$$

$$Cv = 0.98 \rightarrow \text{entrada - recta}$$

$$K = \frac{1}{Cv^2} - 1 = 0.041$$

$$h_{ori} = K \cdot \frac{V_{ori}^2}{2 \cdot g} = 0.041 \cdot \frac{(0.667 m / s)^2}{2 \cdot 9.81 m / s^2} = 9.3 \times 10^{-4} m$$

$$h_T = h_{ori} \cdot 619 = 0.57 m$$

$$h_T = 57 cm = 22.44 in = 1.87 ft$$

Acto seguido, calculamos las pérdidas causadas por los cambios bruscos de sección transversal tanto a la entrada como a la salida del tanque calentador. Sabemos que el diámetro de la tubería es de $\frac{3}{4}$ in, mientras que el del recipiente del tanque es de 3 in.

Tenemos entonces las siguientes formulas del coeficiente de pérdida K para ensanchamiento brusco y estrechamiento brusco, respectivamente:

$$K_1 = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$$

$$K_2 = \left(1 - \frac{1}{C_c}\right)^2; C_c \approx 0.62$$

Por lo tanto proseguimos calculando cada uno de los coeficientes K para remitirnos nuevamente a la formula de Darcy-Wiesbach para obtener las pérdidas de carga resultantes por la entrada y salida del fluido del tanque calentador.

$$K_1 = \left(1 - \frac{0.44in^2}{7.07in^2}\right)^2 = 0.879$$

$$K_2 = \left(1 - \frac{1}{0.62}\right)^2 = 0.376$$

$$h = K_T \cdot \left(\frac{V^2}{2 \cdot g}\right)$$

$$K_T = 0.879 + 0.376$$

$$K_T = 1.255$$

$$h = 1.255 \cdot \left(\frac{(0.667m/s)^2}{2 \cdot 9.81m/s^2}\right)$$

$$h = 0.0285m$$

$$h = 2.85cm = 1.12in = 0.093ft$$

Por lo tanto, habiendo calculado cada una de las pérdidas suscitadas, al sumarlas obtenemos la perdida de carga total en los componentes del sistema mencionados (filtro y tanque), lo que nos da un valor de $H = 59.85 \text{ cm} = 23.56 \text{ in} = 1.96 \text{ ft}$. Para determinar así la perdida de carga final, tanto en las tuberías como en el filtro y el tanque, se suma este resultado con los calculados al inicio de este subcapítulo. Entonces:

$$H_{final} = 8.8cm + 59.85cm$$

$$H_{final} = 68.65cm = 27.03in = 2.25 ft$$

3.7.2 Diseño Crítico de la Bomba Centrífuga

Como fue mencionado en los capítulos anteriores de este documento de tesis, en el diseño de nuestro sistema se realizaría un enfoque bastante más profundo en lo que sería el diseño de la bomba centrífuga destinada en teoría para el funcionamiento del recirculador. Al decir en teoría, hacemos referencia al equipo de bombeo ideal para el sistema, sin embargo, por tema de costos, se procederá a elegir un producto existente en el mercado. A continuación se presentará en este subcapítulo el procedimiento de diseño de la bomba centrífuga en todo su detalle. El procedimiento en su totalidad fue realizado con la ayuda de ejemplos y conceptos presentados en el libro de William Peng, “Fundamentals of Turbomachinery”.

Lo primero que se hace es identificar un punto de diseño al momento de iniciar el procedimiento, que abarca los parámetros con los que se trabajará durante toda su extensión. Con la ayuda de los datos presentados en el TRD (Documento de Requerimientos Técnicos) y en el diseño hidráulico (subcapítulo anterior) hemos establecido como punto de partida para nuestro trabajo los siguientes datos:

Caudal: $Q = 0.19 \text{ L/s} = 3 \text{ GPM}$

Altura de Cabeza: $H = 280.65 \text{ cm} = 110.49 \text{ in} = 9.2 \text{ ft}$

El primer cálculo que se realizó fue el de eficiencia hidráulica, para tener un conocimiento previo del rendimiento de las bombas centrífugas respecto a su capacidad (caudal).

$$\eta_h = 1 - \frac{0.8}{Q^{0.25}} = 1 - \frac{0.8}{(3)^{0.25}}$$

$$\eta_h = 0.39$$

Se puede observar que la eficiencia hidráulica de una bomba crece a medida que su capacidad (caudal mínimo de trabajo) aumenta.

A continuación se determinarán la velocidad específica de la bomba, su eficiencia global, y con ayuda de ésta, su potencia global. Se probaron los resultados de la bomba a diferentes velocidades de rotación, para ubicar su mayor eficiencia de trabajo, de acuerdo al gráfico de eficiencia de bombas del “Pump Handbook”, reimpresso en el libro de Peng.

$$N = 1525 \text{ RPM}$$

$$N_s = \frac{N \cdot Q^{0.5}}{H^{0.75}} = \frac{1525 \cdot (3)^{0.5}}{(9.2)^{0.75}}$$

$$N_s = 500$$

La eficiencia global en función de la velocidad específica es:

$\eta_{o/a} = 0.3$, la cual es levemente menor que la eficiencia hidráulica, lo que es bastante lógico.

$$P_s = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H}{\eta_{o/a}} = \frac{3 \cdot 0.00223 \cdot 62.4 \cdot 9.2}{0.3}$$

$$P_s = 12.8 \frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{s}} = 0.025 \text{ HP}$$

Al observar estos resultados, y por recomendaciones encontradas en el libro de Peng, se procede a elegir un tipo de impeller (impulsor o rodete) puramente radial para nuestra bomba.

Ahora vamos a iniciar con los cálculos dimensionales de la bomba, empezando por la configuración de entrada o de succión.

$$\omega = \frac{N \cdot \pi}{30} = \frac{1525 \cdot \pi}{30} = 159.7 \frac{rad}{s}$$

$$\tau = \frac{P_s}{\omega} = \frac{12.8}{159.7} = 0.08 lbf \cdot ft$$

$$D_{sh} = \left(\frac{16 \cdot \tau}{\pi \cdot \sigma_s} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{16 \cdot 0.08}{\pi \cdot 144 \cdot 1421.37} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$D_{sh} = 0.0126 ft = 0.151 in = 0.38 cm$$

Siendo ω la velocidad angular del impeller en radianes por segundo, τ el torque del eje, D_{sh} el diámetro del eje y finalmente σ_s , el esfuerzo cortante máximo permisible del que sería el material de construcción del impeller, PVC. El siguiente cálculo corresponde al coeficiente de flujo, que nos ayudará a obtener los valores de diámetro de succión y diámetro interior de los álabes.

$$\varphi_e = 0.275$$

$$0.275 = \frac{Q}{\pi \cdot r_e^3 \cdot \omega}$$

$$r_e = \sqrt[3]{\frac{0.00668}{\pi \cdot 0.275 \cdot 159.7}} = 0.0387 ft = 0.4645 in$$

$$D_e = 0.929 in = 2.36 cm$$

$$D_1 = D_e = 0.929 in = 2.36 cm$$

Al coeficiente de flujo = 0.275 se recomienda su valor para diseñadores sin mucha experiencia, por lo general su rango oscila entre 0.25 y 0.30, por lo que se procedió a asignarle el valor medio. De la misma manera, para simplificar el procedimiento de diseño, y adicionalmente para asegurar un flujo puramente radial, se igualaron los diámetros de succión e interior en uno solo. Igualmente, se han convertido las unidades del caudal de diseño de GPM a ft³/s.

$$V_e = \frac{Q}{\pi \cdot \frac{D_e^2}{4}} = \frac{0.00668}{\pi \cdot \frac{(0.0774)^2}{4}} = 1.42 \frac{ft}{s}$$

$$V_1 = 1.05 \cdot V_e = 1.491 \frac{ft}{s}$$

$$A_1 = \frac{Q}{V_1} = \frac{0.00668}{1.491} = 0.00448 ft^2 = 0.645 in^2$$

$$A_1 = \pi \cdot (r_{i1} + r_{h1}) \cdot b_1 \cdot \varepsilon_1$$

$$b_1 = \frac{A_1}{\pi \cdot (r_{i1} + r_{h1}) \cdot \varepsilon_1} = \frac{0.645}{\pi \cdot 2(0.4645) \cdot 0.8} = 0.276 in = 0.7 cm$$

En este caso hemos procedido a calcular las velocidades del fluido en la succión y en la entrada a los álabes, respectivamente. Con estos resultados, obtuvimos el área interior de los álabes y la altura interior de los álabes. Utilizamos el factor de contracción en 0.8 como se recomendó, de la misma manera que el coeficiente de flujo, para diseñadores sin experiencia. Acto seguido se determinarán las últimas magnitudes y dimensiones de la configuración de entrada, como son la velocidad tangencial del impeller respecto al diámetro interior, la velocidad relativa del fluido respecto al impeller en su diámetro interior, y por último, los ángulos de incidencia entre el fluido y los álabes, y entre los álabes y el impeller, todo en ese orden.

$$U_1 = \frac{D_1 \cdot \omega}{2} = \frac{\left(\frac{0.929}{12}\right) \cdot 159.7}{2} = 5.17 \frac{ft}{s}$$

$$W_1 = \sqrt{(U_1)^2 + (V_1)^2} = \sqrt{(5.17)^2 + (1.491)^2} = 5.38 \frac{ft}{s}$$

$$\beta_{f1} = \tan^{-1}\left(\frac{V_1}{U_1}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{1.491}{5.17}\right) = 16.09^\circ$$

$$i = \beta_{f1} - \beta_{b1} \approx 3^\circ$$

$$\beta_{b1} = 20^\circ$$

A continuación continuaremos con el diseño de nuestra bomba centrífuga, siguiendo el procedimiento de acuerdo a lo indicado, con la configuración de salida o de descarga.

$$\omega_s = \frac{\omega \cdot Q^{0.5}}{(g \cdot H)^{0.75}} = \frac{159.7 \cdot (0.00668)^{0.5}}{(233.26)^{0.75}} = 0.183$$

$$\omega_s = 0.183 \rightarrow \Delta s \approx 12$$

$$\Delta s = \frac{D_2 \cdot (g \cdot H)^{0.25}}{Q^{0.5}}$$

$$D_2 = \frac{\Delta s \cdot Q^{0.5}}{(g \cdot H)^{0.25}} = \frac{12 \cdot (0.00668)^{0.5}}{(233.26)^{0.25}} = 0.25 ft$$

$$D_2 = 3in = 7.62cm$$

$$U_2 = \frac{D_2 \cdot \omega}{2} = \frac{0.25 \cdot 133.52}{2} = 16.69 \frac{ft}{s}$$

En este caso, nos hemos tenido que remitir al diagrama de Cordier, presente en el libro “Theory of Turbomachines” de Csanady, cuya ilustración también ha sido reimpresa en el libro de Peng. Este diagrama relaciona la velocidad específica adimensional ω_s con el diámetro específico adimensional Δs , y de esta manera poder calcular el diámetro exterior del impeller y la velocidad tangencial del mismo en su punto externo. A continuación se define el

ángulo de incidencia de salida entre los álabes y el impeller, y acto seguido, se procederá a calcular el número de álabes con el que contará en el impeller y su factor de deslizamiento.

$$\beta_{b2} = 25^\circ$$

$$\nu = \frac{D_1}{D_2} = 0.3$$

$$Z_b = 6.5 \cdot \left[\frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \right] \cdot \sin \left[\frac{(\beta_{b1} + \beta_{b2})}{2} \right] = 6.5 \left[\frac{1.3}{0.7} \right] \cdot \sin \left[\frac{45}{2} \right] = 4.62$$

$$Z_b = 5$$

$$\mu_s = 1 - \pi \cdot \sin \left(\frac{\beta_{b2}}{Z_b} \right) = 1 - \pi \cdot \sin \left(\frac{25}{5} \right) = 0.726$$

Ahora continuaremos con el cálculo del área de descarga. Asimismo, se determinarán las velocidades meridionales y tangenciales del fluido, para calcular la velocidad relativa del fluido respecto al impeller en su descarga. Finalmente, se procederá a obtener la dimensión de la altura de los álabes en la salida, con ayuda del factor de contracción a la descarga, para el cual hemos tenido que intuir en un grosor adecuado de los álabes, de acuerdo a la resistencia del PVC y a las condiciones de trabajo a las que se verán sometidos.

$$H_a = \eta_h \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{U_2}{g} \right) \cdot \left[U_2 - \frac{Q}{(A_2 \cdot \tan \beta_{b2})} \right]$$

$$A_2 = \frac{Q}{\tan \beta_{b2} \cdot \left[U_2 - \frac{H}{\eta_h \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{U_2}{g} \right)} \right]} = \frac{0.00668}{\tan 25^\circ \cdot \left[16.69 - \frac{9.2}{0.39 \cdot 0.726 \cdot \left(\frac{16.69}{32.2} \right)} \right]}$$

$$A_2 = 0.000439 \text{ ft}^2 = 0.063 \text{ in}^2$$

$$V_{m2} = \frac{Q}{A_2} = \frac{0.00668}{0.000439} = 15.216 \frac{ft}{s}$$

$$V_{u2} = \frac{g \cdot H}{\eta_h \cdot U_2} = \frac{32.2 \cdot 9.2}{0.39 \cdot 16.69} = 35.83 \frac{ft}{s}$$

$$W_2^2 = V_{m2}^2 + (U_2 - V_{u2})^2$$

$$W_2 = \sqrt{231.53 + 366.34}$$

$$W_2 = 24.45 \frac{ft}{s}$$

$$t = 0.1in = 0.25cm$$

$$\varepsilon_2 = 1 - \frac{Z_b \cdot t}{(\pi \cdot D_2 \cdot \sin \beta_{b2})} = 1 - \frac{5 \cdot 0.1}{(\pi \cdot 3 \cdot \sin 25^\circ)} = 0.874$$

$$A_2 = \varepsilon_2 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot b_2$$

$$b_2 = \frac{A_2}{\varepsilon_2 \cdot \pi \cdot D_2} = \frac{0.063}{0.874 \cdot \pi \cdot 3} = 0.0076in = 0.02cm$$

Como último paso del procedimiento de diseño del impeller de nuestra bomba centrífuga, es el de determinar las magnitudes del perfil de los álabes, es decir, la vista frontal del álabe cuando se coloca el disco o impeller boca arriba. Dicho perfil también debe ser calculado según las normas. Nosotros hemos elegido una distribución angular del perfil de los álabes lineal, para simplificar el diseño tomando en cuenta que no contamos con la experiencia suficiente para experimentar nuevas formas, y además para asegurar así, lo que buscamos que es un flujo puramente radial.

$$\beta_b = \beta_{b1} + \frac{(\beta_{b2} - \beta_{b1})}{(r_2 - r_1)} \cdot (r - r_1)$$

$$\beta_b = 20 + \frac{(25 - 20)}{(1.5 - 0.4645)} \cdot (r - 0.4645)$$

$$\beta_b = 20 + 4.829 \cdot (r - 0.4645)$$

Ésta última corresponde a la ecuación de la distribución angular del perfil de los álabes. A continuación se presentará una tabla de datos que contienen varios diferenciales de radios y ángulos β de modo que se obtengan los resultados de longitud total de los álabes, que a su vez nos ayudará a calcular la solidez de los mismos, un parámetro sumamente importante al momento de evaluar el rendimiento de una bomba centrífuga.

r (in)	β	d ϕ	ϕ (deg)	dL	L (in)
0	0	0	0	0	0
0.4645	20	85.92799	0	0.741331	0
0.56805	20.50004	68.40077	85.92799	0.723998	0.741331
0.6716	21.00009	56.35029	154.3288	0.70751	1.465329
0.77515	21.50013	47.57733	210.6791	0.691808	2.172839
0.8787	22.00017	40.91969	258.2564	0.676838	2.864647
0.98225	22.50021	35.70551	299.1761	0.662552	3.541486
1.0858	23.00026	31.51948	334.8816	0.648905	4.204038
1.18935	23.5003	28.09108	366.4011	0.635856	4.852943
1.2929	24.00034	25.23662	394.4922	0.623368	5.488798
1.39645	24.50039	22.82701	419.7288	0.611407	6.112166
1.5	25.00043	20.76892	442.5558	0.599941	6.723573

Tabla 3. Cálculos de Longitud Total de los álabes.

Por lo tanto con los siguientes datos: $\beta = 25^\circ \rightarrow L = 6.7236$ in, se calcula la solidez de los álabes:

$$\sigma_s = \frac{Z_b \cdot L}{\pi \cdot D_2} = \frac{5 \cdot 6.7236}{\pi \cdot 3} = 3.5$$

Este es un factor adimensional que nos indica la relación que existirá entre las dimensiones generales del impeller y el comportamiento que tendrá el fluido al pasar por los álabes de nuestra bomba. Se recomienda que el rango de solidez se encuentre en $2.5 \sim 3$. En nuestro caso, se ha sobrepasado este rango por 0.5, cosa que es bastante aceptable y lógico al momento de explicar su razón. William Peng expresa que el ser la solidez muy baja, el fluido no será adecuadamente guiado a través del impeller, pero si resulta muy alto, se sufrirá de mucha fricción dentro del mismo. Esto quiere decir que el agua que fluirá por nuestra bomba se verá afectada por una fricción algo alta, factor que fue tomado en cuenta de antemano en nuestro diseño, ya que es de conocimiento común en el campo de la turbo maquinaria que las bombas con baja velocidad específica sufren por lo general de fricción en su interior. Es por esta razón, que nos hemos anticipado a esta dificultad y añadimos un factor de seguridad razonable especialmente al grosor asignado a los álabes, de modo que se evite cualquier contratiempo durante el funcionamiento de la bomba centrífuga.

Como último paso en el procedimiento de diseño de una bomba centrífuga es el diseño de la voluta o carcasa del impeller. La determinación de los parámetros y dimensiones de dicho componente de la bomba depende básicamente del esfuerzo que tenga que resistir por el movimiento giratorio a altas velocidades del impeller, y por la cantidad de fluido que vaya a contener desde la succión hasta la descarga del mismo. En primer lugar se determinará el momento angular del impeller. Adicionalmente se calculará la velocidad de salida del fluido y

el área de salida de la voluta, además del radio concéntrico del impeller que termina en el borde interior de la voluta, que llamaremos r_3 .

$$L = r_2 \cdot V_{u2} = \frac{1.5in}{12} \cdot 35.83 \frac{ft}{s}$$

$$L = 4.479 \frac{ft^2}{s}$$

Con la ayuda de la figura 4.24 del libro de Peng, obtenemos la constante de velocidad de la voluta respecto a la velocidad específica de la bomba. De igual manera, con la misma gráfica obtenemos la diferencia porcentual entre diámetros 2 y 3.

$$N_s = 500 \rightarrow K_3 = 0.54$$

$$V_t = K_3 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 0.54 \cdot \sqrt{2 \cdot 32.2 \cdot 9.2}$$

$$V_t = 11.66 \frac{ft}{s}$$

$$A_t = \frac{Q}{V_t} = \frac{0.00668}{11.66} = 0.000573 ft^2 = 0.0825 in^2$$

$$N_s = 500 \rightarrow \frac{D_3 - D_2}{D_2} = 0.05$$

$$r_3 = 1.5 \cdot (1 + 0.05) = 1.575 in$$

$$D_3 = 3.15 in = 8 cm$$

A continuación elegimos la base del área seccional de la voluta como se recomienda en el procedimiento del libro de Peng:

$$b = 2 \cdot b_2 = 0.0152 in = 0.0386 cm$$

Ahora se presentarán las ecuaciones finales que describen la geometría que tendrá la voluta alrededor de todo el impeller:

$C \cong 0.95 \rightarrow$ *recomendado*

$$A_{\theta} = \frac{Q \cdot \theta \cdot r_c}{2 \cdot \pi \cdot C \cdot L} = \frac{0.00668 \cdot \theta \cdot r_c}{2 \cdot \pi \cdot 0.95 \cdot 4.479} \rightarrow A_{\theta} = 0.00025 \cdot \theta \cdot r_c$$

$$r_c = r_3 + \sqrt{\frac{A_{\theta}}{\pi}} \rightarrow r_c = 1.575 + \sqrt{0.318 \cdot A_{\theta}}$$

$$A_{\theta} = \frac{h \cdot (a + 0.0152)}{2}$$

$$\varphi \cong 30^{\circ} \rightarrow \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{(a - 0.0152)}{2 \cdot h}$$

$$x_c = \frac{h \cdot (2 \cdot a + 0.0152)}{3 \cdot (a + 0.0152)}$$

Tenemos las ecuaciones para describir la geometría de la voluta alrededor de toda la circunferencia del impeller, por lo que basta definir un ángulo φ en radianes, para que las ecuaciones se conviertan en un sencillo sistema de cinco ecuaciones con cinco incógnitas, para que fácilmente podamos determinar los valores de A_{θ} , r_c , h , a y x_c en cada punto de la circunferencia del impeller.

Es así como hemos concluido el diseño de la bomba centrífuga para nuestro sistema de recirculación y recalentamiento de agua, por lo que la ilustración gráfica del impeller diseñado será el último paso y se lo presentara en el subcapítulo posterior de Modelos 3D Paramétricos.

3.7.3 Diseño de Transferencia de Calor del Tanque Calentador

Es momento de realizar un cambio de enfoque académico en la continuación de nuestro diseño crítico, para movernos de la bomba centrífuga, en la que se utilizaron los

conceptos aprendidos en Turbo máquinas, al tanque calentador, en el cual los conocimientos de Transferencia de Calor son los primordiales para su correcto desarrollo.

Como en cualquier etapa de un diseño, es indispensable tener en primer lugar totalmente claro qué es lo que se necesita diseñar y para qué. Es así como se llega a lo que se llegó en el inicio del trabajo con la bomba: a un punto de diseño en el que se detallan todos los parámetros y datos técnicos requeridos.

Nuestro sistema necesita de un tanque calentador que reciba el agua presurizada por la bomba y rápidamente consiga recalentar el fluido a la temperatura que se requiera, para que éste salga a través de las tuberías determinadas en el diseño hidráulico hasta la boquilla superior de la ducha. Para esto se han establecido los siguientes parámetros:

- Se trata de un sistema radial de conducción térmica unidireccional con generación de energía de origen eléctrico, analizado en estado estable, es decir que la tasa de almacenamiento de energía térmica es igual a cero.
- La forma física del serpentín será de un cable de dimensiones y material a determinar enrollado en espiral a lo largo y ancho de todo el interior del tanque, para asegurar el contacto con la mayor parte del fluido a calentar.
- La temperatura del fluido que se desea será de los 40 °C mencionados en el documento de requerimientos técnicos, multiplicada por un factor de seguridad de 1.3, lo que resulta en una temperatura de 52 °C = 325 K.

- Se asume una temperatura de los alrededores del serpentín de $27\text{ }^{\circ}\text{C} = 300\text{ K}$, correspondiente a la temperatura mínima medida del agua al reiniciar su ciclo de recirculación cuando entra del desagüe a la bomba.
- La diferencia de potencial eléctrico que llega a los bornes del serpentín es de 110 V .
- Se establece como punto de partida una temperatura de la superficie del cable de los $52\text{ }^{\circ}\text{C}$, multiplicada por un factor de seguridad de 1.5 , para evitar retardos en el calentamiento, lo que nos entrega una $T_s = 78\text{ }^{\circ}\text{C} = 351\text{ K}$.
- Por último, se realizará el diseño con dos alternativas de materiales para la varilla larga o cable calentador: Nicromo e Inconel X-750, de esta manera podremos comparar resultados y analizar de manera más precisa el material más conveniente para nuestro sistema.

Iniciamos realizando el balance de energía del caso que tenemos:

$$\dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st}$$

$$\dot{E}_{st} = 0$$

$$\dot{E}_g = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{q} \cdot V = h \cdot (\pi \cdot D \cdot L)(T_s - T_{\infty}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (\pi \cdot D \cdot L)(T_s^4 - T_{sur}^4)$$

Esta ecuación se resume en las dos siguientes:

$$\dot{q} = \frac{2 \cdot h_T}{r} (T_s - T_{\infty})$$

$$h_T = h_{H_2O} + h_r$$

$$h_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2)$$

Considerando al coeficiente de convección del agua igual a $1000 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, debido a un flujo del líquido a una temperatura cercana a los 30 °C.

Nicromo:

$$h_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s + T_{sur}) (T_s^2 + T_{sur}^2)$$

$$h_r = 0.20 \cdot 5.67 \times 10^{-8} \cdot (351 + 300) \cdot (351^2 + 300^2)$$

$$h_r = 1.574 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$h_T = h_{H_2O} + h_r$$

$$h_T = 1000 + 1.574$$

$$h_T = 1001.574 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\dot{q} = \frac{2 \cdot h_T}{r} (T_s - T_\infty)$$

$$\dot{q} = \frac{2 \cdot 1001.574}{0.0005} (351 - 325)$$

$$\dot{q} = 104.16 \times 10^6 \frac{W}{m^3}$$

$$I^2 = \frac{\dot{q} \cdot V}{Re} = \frac{\dot{q} \cdot A^2}{\rho}$$

$$I = \sqrt{\frac{\dot{q}}{\rho}} \cdot A$$

$$I = \sqrt{\frac{104.16 \times 10^6 \frac{W}{m^3}}{1.5 \times 10^{-6} \Omega \cdot m}} \cdot \pi \cdot \frac{(0.001m)^2}{4}$$

$$I = 6.54A$$

$$L_T = \frac{\Delta V \cdot A}{I \cdot \rho}$$

$$L_T = \frac{110V \cdot \pi \cdot \frac{(0.001m)^2}{4}}{6.54A \cdot 1.5 \times 10^{-6} \Omega \cdot m}$$

$$L_T = 8.8m$$

Inconel X-750:

$$h_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s + T_{sur}) (T_s^2 + T_{sur}^2)$$

$$h_r = 0.19 \cdot 5.67 \times 10^{-8} \cdot (351 + 300) \cdot (351^2 + 300^2)$$

$$h_r = 1.495 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$h_T = h_{H_2O} + h_r$$

$$h_T = 1000 + 1.495$$

$$h_T = 1001.495 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\dot{q} = \frac{2 \cdot h_T}{r} (T_s - T_\infty)$$

$$\dot{q} = \frac{2 \cdot 1001.495}{0.0005} (351 - 325)$$

$$\dot{q} = 104.15 \times 10^6 \frac{W}{m^3}$$

$$I^2 = \frac{\dot{q} \cdot V}{\text{Re}} = \frac{\dot{q} \cdot A^2}{\rho}$$

$$I = \sqrt{\frac{\dot{q}}{\rho}} \cdot A$$

$$I = \sqrt{\frac{104.15 \times 10^6 \frac{W}{m^3}}{1.22 \times 10^{-6} \Omega \cdot m}} \cdot \pi \cdot \frac{(0.001m)^2}{4}$$

$$I = 7.26A$$

$$L_T = \frac{\Delta V \cdot A}{I \cdot \rho}$$

$$L_T = \frac{110V \cdot \pi \cdot \frac{(0.001m)^2}{4}}{7.26A \cdot 1.22 \times 10^{-6} \Omega \cdot m}$$

$$L_T = 9.75m$$

Con la ayuda de estos resultados obtenidos, se puede llegar a la conclusión de que la utilización de Nicromo para la fabricación del serpentín calentador sería más eficiente al momento de revisar el diseño crítico del sistema, sin embargo para la construcción de nuestro prototipo debemos necesariamente comparar los costos de ambos materiales y su constante existencia en el mercado ecuatoriano.

De igual manera, observando los resultados arrojados por ambos materiales, y tomando en cuenta los cálculos del diseño hidráulico presentados en el subcapítulo 3.7.1, podemos intuir bajo parámetros lógicos, que la capacidad del recipiente que contendrá las resistencias eléctricas puede oscilar entre 1L y 1.5L para no generar una desaceleración excesiva del flujo.

Como último paso de la revisión del diseño crítico del tanque calentador, se ha procedido a realizar una simulación en el paquete de análisis numérico MATLAB, en el cual se han ingresado los parámetros de nuestro sistema en una función de balance de energía, pero no en estado estable, sino en transitorio, para observar el comportamiento de las resistencias con el paso del tiempo. A continuación se verán ilustrados, tanto el código y la función ingresados en MATLAB, como los gráficos resultantes arrojados por el programa.

```
function F=tubo(t,T)
```

```
F=(6.54^2*1.5-pi()*1*(T-325)-pi()*0.001*0.2*5.67E-8*(T^4-300^4))/(8400*420*pi()*(0.001)^2/4);
```

```
>> tspan=[0 20]; To=300;
```

```
>> [t T]=ode45('tubo',tspan,To)
```

```
>> plot(t,T)
```

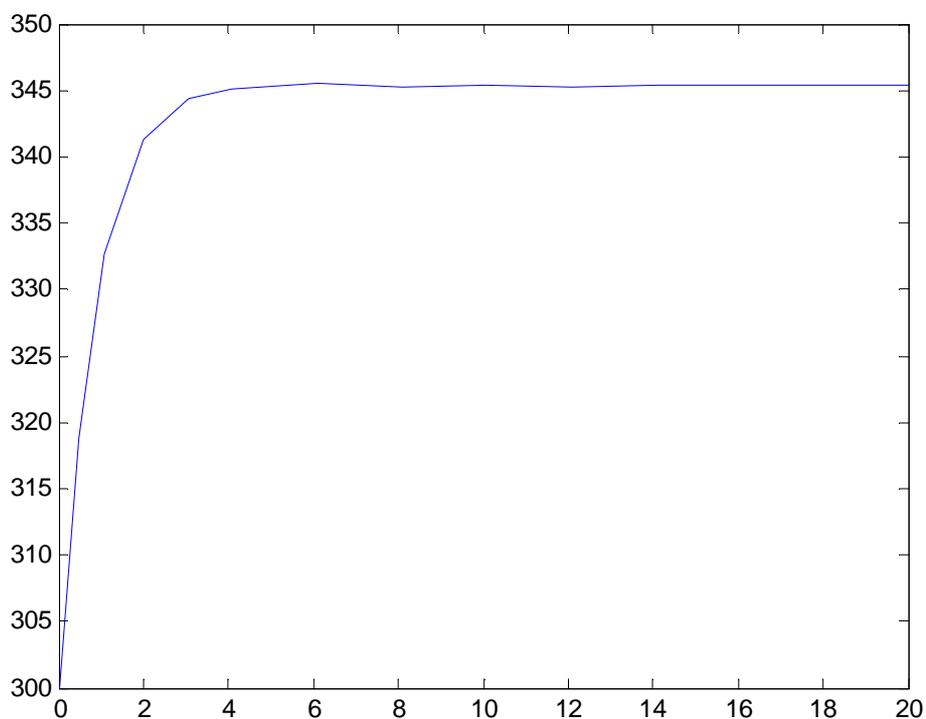


Figura 8. Gráfico de Estado Transitorio del sistema de recalentamiento.

Esta figura nos indica que cerca de 4 segundos tomarían las resistencias para alcanzar una temperatura muy cercana a la calculada anteriormente, por lo que el sistema tendría un rendimiento totalmente aceptable. Alrededor de 345 K o 72 °C es el valor en el cual se asienta la curva de temperatura respecto al tiempo transcurrido.

3.8 Modelos 3D Paramétricos

El objetivo principal de este subcapítulo es el de dejar totalmente establecidas las dimensiones exactas que han sido determinadas a lo largo del diseño del sistema de

recirculación y recalentamiento de agua. Es por eso que ilustraremos parte por parte cada componente del sistema con sus respectivas cotas, de modo que no exista ningún tipo de confusión que pueda haber quedado a partir de los resultados del subcapítulo anterior, Revisión del Diseño Crítico.

A continuación se presentan los modelos 3D paramétricos de los componentes que conforman nuestro sistema:

- Tanque Calentador:

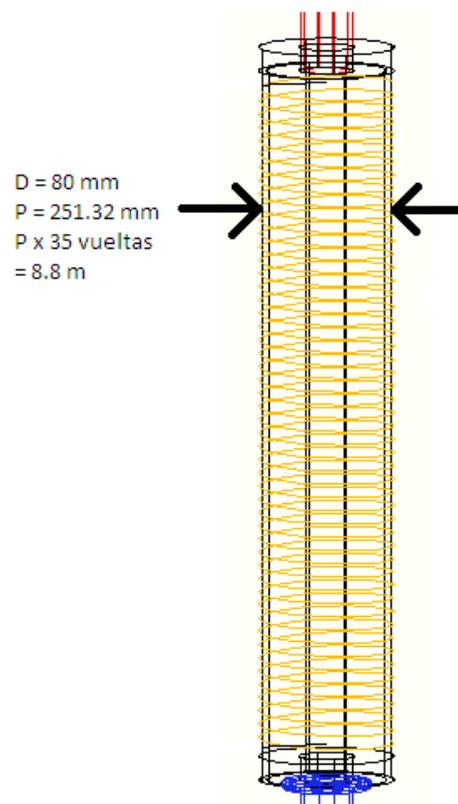


Figura 9. Modelo 3D Paramétrico del tanque calentador

- Sistema de tuberías:

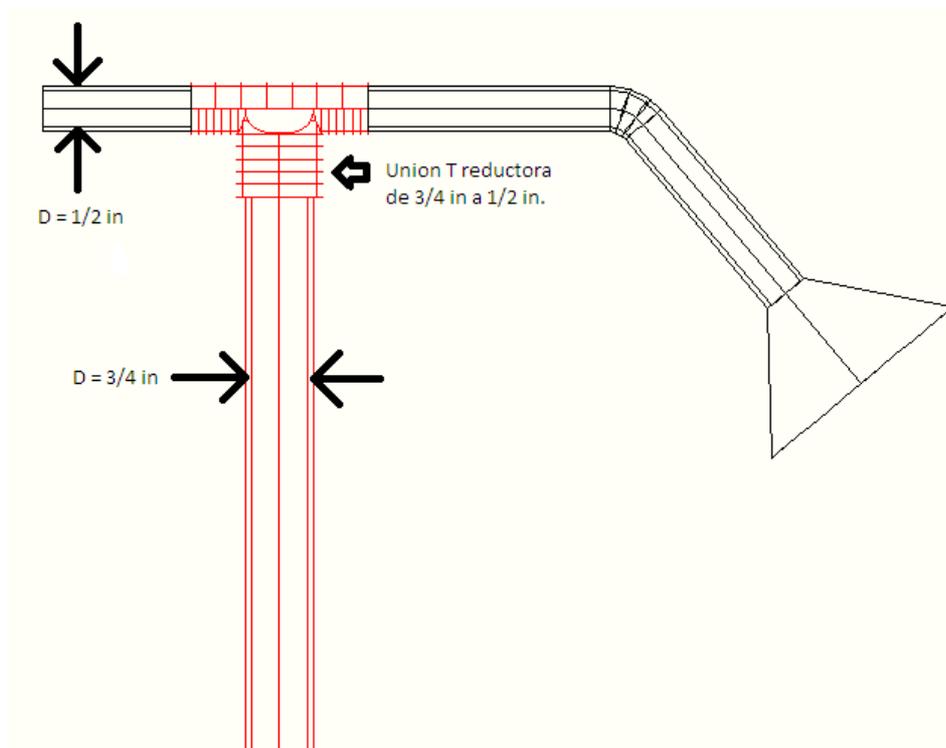


Figura 10. Modelo 3D Paramétrico del sistema de tuberías y unión T.

- Impeller de Bomba Centrífuga:

- 1) Construcción del disco base del impeller

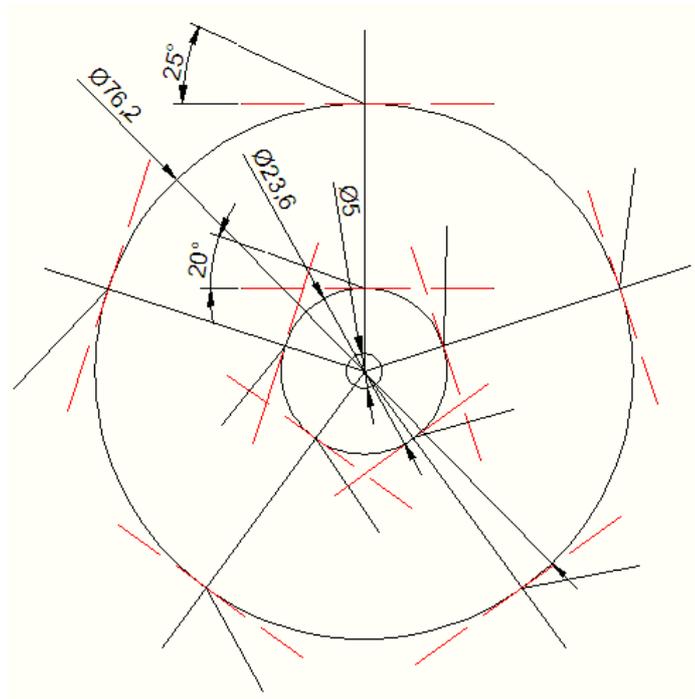


Figura 11. Construcción del disco del impeller de la bomba centrífuga.

2) Construcción del álabe y perfil de alabé

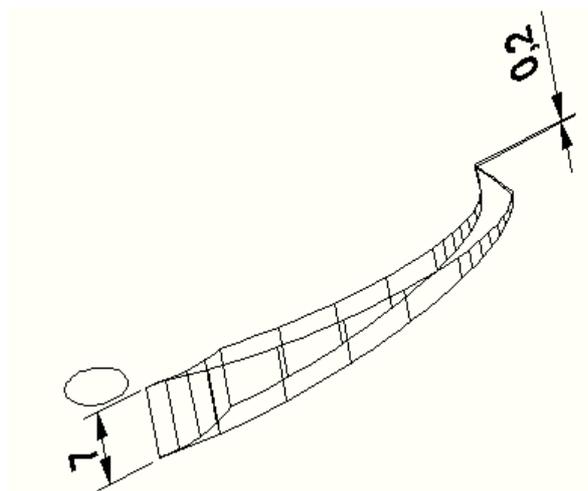


Figura 12. Construcción del álabe de la bomba centrífuga

3) Diseño Final integrado del Impeller

Vista Superior:

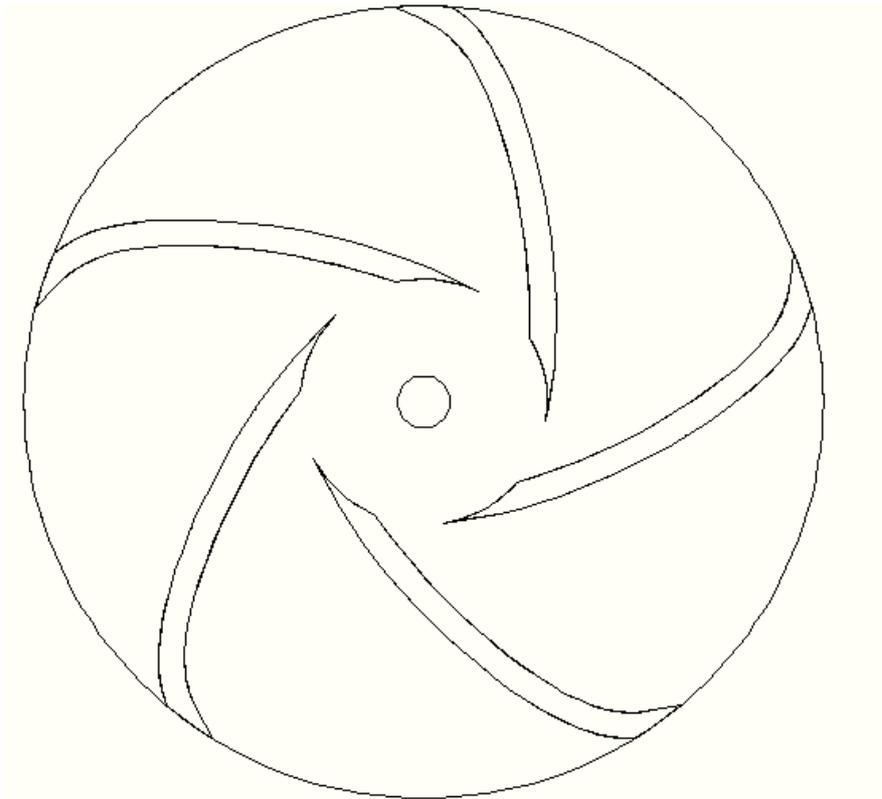


Figura 13. Vista Superior del impeller de la bomba centrífuga.

Vista Frontal:

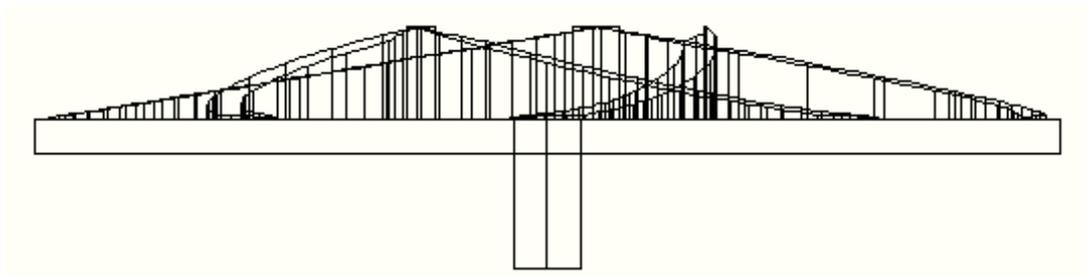


Figura 14. Vista Frontal del impeller de la bomba centrífuga.

Vista Isométrica:

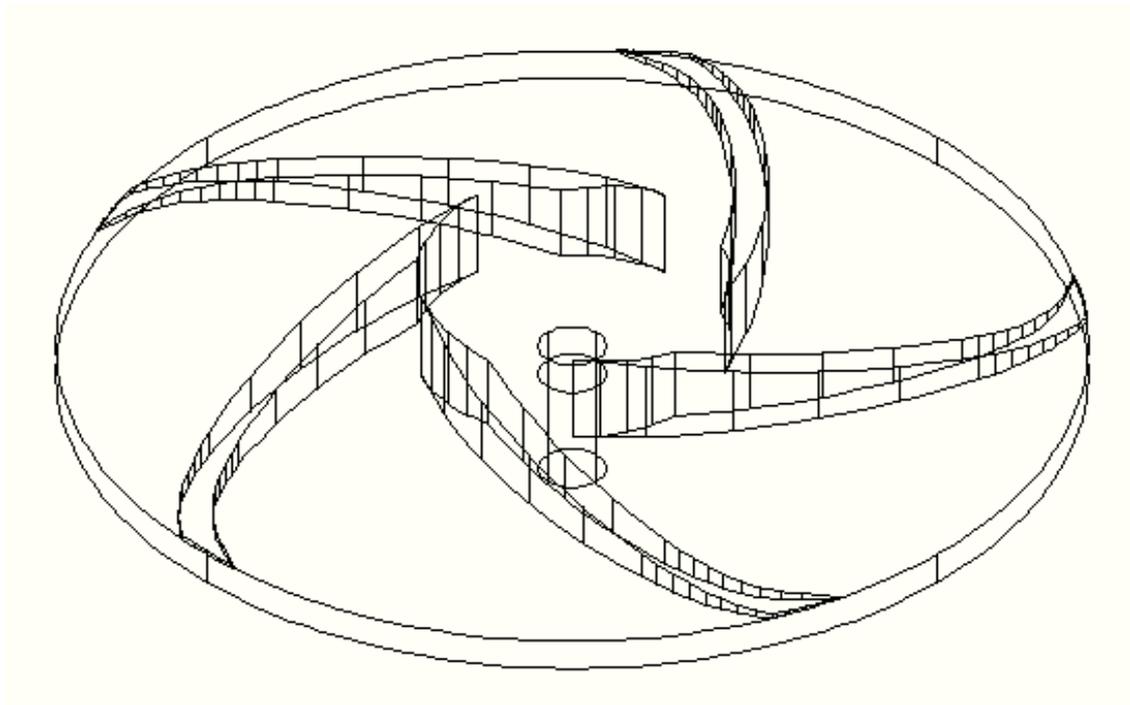


Figura 15. Vista Isométrica del impeller de la bomba centrífuga.

3.9 Reportes de Pruebas Técnicas

Los tipos de pruebas técnicas que se han realizado en nuestro sistema para garantizar su correcto funcionamiento, o por lo menos, respaldarlo con procedimientos validos, son los siguientes, y serán explicados uno por uno a continuación:

- Cálculos de Mecánica y Dinámica de Fluidos

- Cálculos y simulaciones en estados transitorio y estable de Transferencia de Calor
- Tomas de datos experimentales
- Referencias de los fabricantes

En primer lugar, tanto para el sistema hidráulico, comprendido por tuberías y demás accesorios, se han realizado los cálculos de mecánica de fluidos necesarios para asegurar el flujo de agua deseado. De igual manera al momento de diseñar el impeller de nuestra bomba centrífuga, los cálculos de dinámica de fluidos y los resultados obtenidos demuestran un factor de seguridad muy alto en cada una de las partes del impulsor y su interacción con los componentes externos esta más que garantizada. Cada uno de los pasos seguidos para completar dichos cálculos ha sido detallado en los subcapítulos respectivos de la Revisión del Diseño Crítico.

En segundo lugar, las pruebas teóricas y prácticas para corroborar la validez de los parámetros del tanque calentador se han realizado con varias herramientas. Los cálculos se han completado con dos materiales posibles, con sus respectivas dimensiones e intensidades de corriente eléctrica para que funcionen correctamente en estado estable. De igual manera, la herramienta computacional de MATLAB ha permitido que el recorrido del sistema de calentamiento desde su encendido hasta su estado estable sea simulado con sencillas funciones dependientes del tiempo. Por lo que el estado transitorio del sistema también ha sido tomado en cuenta, y su validez totalmente demostrada.

Estas pruebas teóricas no se han alejado de la realidad, ya que los resultados de los datos experimentales tomados son satisfactoriamente cercanos. Se ha llenado el tanque que

simula el desagüe de la ducha en el prototipo, con agua proveniente directamente del servicio público, es decir a 16°C. Transcurridos breves minutos, la temperatura del agua que recircula por el sistema ha sido medida con un termómetro, y se han arrojado valores comprendidos entre los 28 y 30 °C, es decir, el gradiente de 13 °C establecido en el Documento de Requerimientos Técnicos es cubierto con éxito, con la única diferencia práctica de una leve demora en su rendimiento. Justamente, por esta razón ha sido incluida una llave de paso en el prototipo, para jugar con el flujo de agua, cuya velocidad influye directamente en el coeficiente de convección que actúa en las resistencias, y por ende, en su temperatura final y en el tiempo de alcance de la misma.

Sin conformarse con estas pruebas, se ha realizado una última demostración de la calidad de las resistencias, tanto en su potencia eléctrica como en su conductividad térmica. Una pequeña lavacara de plástico fue llenada con agua igualmente fría, a 16 °C. El serpentín de cromo-níquel fue conectado a la toma de 110 V e ingresado en el agua en reposo. Luego de algunos minutos, el agua entro en proceso de cambio de estado, logrando su total ebullición, por lo que se procedió a desconectar las resistencias para no comprometer su integridad. Sin embargo, y de palabras propias del fabricante (Resistencias Eléctricas Ohmio), la temperatura máxima que alcanzan y en la que se asientan en agua en reposo bordea los 380 °C.

Por último, las referencias de los fabricantes, aparte del ya mencionado, son los de las tuberías y accesorios de polietileno (Plastigama) y de la bomba (Paolo). Las especificaciones técnicas que se entregan son de gran importancia, al momento de trabajar con componentes de diferentes proveedores, para realizar una correcta integración. Las tuberías de Plastigama pueden trabajar a temperaturas recomendables de 60 °C y podrían resistir hasta aquellas que

excedan los 85 °C. De igual manera, la resistencia a la presión de estos tubos sobrepasa los 12.9 kg/cm², o 187 psi. Con un sencillo cálculo de presiones, concatenamos los datos de la bomba Paolo (cabeza de presión máxima = 40 m, lo que entrega una presión de 56.9 psi) con los de las tuberías y obtenemos factores de seguridad de temperatura y resistencia a la presión, de 1.5 y 3.28, respectivamente. Esto tomando en cuenta los valores máximos que se alcanzarían, lo cual no sucedería a menos que se den casos extremos, en el sistema.

3.10 Planes de Mantenimiento

Tal vez algo de lo más conveniente para los usuarios del sistema de recirculación y recalentamiento de agua es el sencillo interfaz que tiene con los mismos, pero sobretodo el mantenimiento casi nulo que requiere para su correcto funcionamiento. Existe un componente en todo el sistema cuyo cuidado es verdaderamente indispensable, para su propia integridad, pero especialmente para la integridad de los dos equipos más importantes y costosos del conjunto: la bomba y el tanque calentador. Este componente es el filtro de agua, ubicado justo antes de la válvula de anti retorno, al final de la manguera de succión.

En este subcapítulo hacemos especial, y tal vez único énfasis en dicho filtro, ya que su condición influye directamente en la condición del resto de componentes, tal como se mencionó. El usuario deberá prestar especial atención al filtro, ya que su limpieza es de vital importancia. Esta pieza evita que cualquier tipo de impurezas ingresen al impeller de la bomba, asimismo, previene de cualquier tipo de reacciones químicas negativas a las resistencias eléctricas y sus terminales. La bomba (tanto la diseñada como la del prototipo) está destinada a trabajar con agua limpia pura, sin metales pesados, y peor aun con residuos del baño como pelos o jabón. Si se da este caso, se reducirá sustancialmente su vida útil.

De igual manera sucede con el tanque, cuya integridad puede ser seriamente afectada por dos razones que conciernen directamente al filtro de agua. En primer lugar está el material del que están hechos los terminales de ojo que conducirán la electricidad, cobre, que al estar en contacto directo con sustancias bases como el jabón o alguna salinidad en el agua producto del cabello humano u otros accesorios de cuidado personal, tiende a producir óxido en su superficie, lo que disminuye la conductividad eléctrica sobremanera y las propiedades mecánicas de los terminales. En segundo lugar, y como escenario más grave, está el taponamiento total del filtro por falta de mantenimiento. Esta situación produciría el secado del circuito, que al encontrarse falto de agua ocasionaría una posible falla en la bomba, pero más que nada, un seguro daño en el tanque calentador. La falta de agua significaría falta de refrigeración para el cable resistivo y para el recipiente, dando a lugar un peligroso aumento de temperatura en las resistencias y el inmediato derretimiento del material del tanque.

Debido a estas razones se alienta a los usuarios a cumplir con un sencillo pero muy importante plan de mantenimiento del sistema, para disminuir al mínimo el riesgo de falla en cualquiera de los componentes, y lo que es más importante, evitar todo tipo de accidentes.

Otro componente que en ciertas ocasiones puede presentar comportamientos algo desconocidos para los usuarios es la bomba. Debido al ambiente permanentemente mojado en el que se encuentra, siempre se pueden formar pequeñas oxidaciones en sus partes metálicas, por lo que el pleno ajuste entre piezas puede verse comprometido. Es por esto, que para garantizar su funcionamiento correcto y una máxima vida útil, se recomienda cebar la bomba antes de su primer uso y adicionalmente girar el ventilador posterior esporádicamente con la

ayuda de un destornillador o alguna herramienta similar, de modo que cualquier traba mecánica sea evitada y así se evite también forzar al motor eléctrico.

4. Conclusión

4.1 Resumen de actividades

En general el trabajo que se realizó para el cumplimiento de este proyecto de tesis de grado fue bastante lineal. Al decir esto me refiero a que las actividades se fueron completando una por una y la actividad que precedía a la siguiente debía haber sido finalizada para iniciar con la otra. En ciertos aspectos esto contribuyó con el ágil avance del proyecto de tesis. Con mencionar únicamente a ciertos aspectos hago referencia a algunas actividades particulares que se vieron en algunos momentos y por determinadas razones trabadas y que me obligaron a parar con el progreso abruptamente, sin embargo y para fortuna de nuestros intereses, estas paras fueron definitivamente escasas. En este subcapítulo describiremos una por una y en orden cronológico las actividades que fueron cumplidas a lo largo de estos cuatro meses de trabajo.

En los primeros días de iniciado el trabajo, las reuniones con el profesor asesor de tesis fueron bastante frecuentes, ya que el comienzo es sin duda la parte más complicada, al no tener el alumno experiencia, se presentan la mayor cantidad de dificultades y dudas sobre por

dónde empezar, en qué orden proseguir con las instrucciones y otras disyuntivas que causan ciertos atrasos. Sin embargo, una vez superados estos inconvenientes, el paso de avance fue bastante satisfactorio.

Lo primero que se realizó fue conseguir la mayor cantidad de información posible sobre los siguientes temas: situación hidrográfica del Ecuador, índices de consumo de agua a nivel nacional e internacional, flujo de fluidos en tuberías y otros accesorios hidráulicos, pérdidas de carga, turbo maquinaria, bombas, tipos de bombas, bombas centrífugas, transferencia de calor y finalmente resistencias eléctricas utilizadas para calentar fluidos. Dentro de los temas más técnicos e involucrados con mi carrera, Ingeniería Mecánica, de los que han sido mencionados, me mantuve siempre en contacto con proveedores y distribuidores de distintos tipos de materiales, para basar mi diseño en gran parte en componentes y equipos disponibles en el mercado ecuatoriano.

Una vez terminada esta recopilación de literatura y referencias bibliográficas (siempre hubo necesidad de buscar algo adicional a lo largo del trabajo, aunque fueron cosas puntuales y mucho mas específicas) procedí tomar datos estadísticos de la realidad quiteña en cuanto a instalaciones sanitarias domesticas existentes, de esta manera conseguí los datos que serían punto de partida de mi diseño. Inmediatamente, teniendo una idea clara de que requerimientos técnicos debía alcanzar, proseguí con la realización de varios diseños básicos de lo que debíamos lograr al final del trabajo. Fueron varios los dibujos a mano que se elaboraron hasta lograr algo que podría ser desarrollado con éxito y de una forma viable en cuanto a costos y disponibilidad de material en nuestro país. Así es como deseché las últimas alternativas antes de llegar a la adecuada para continuar con el diseño preliminar. Una vez discutido esto con mi

director de tesis, se procedió al instante a elaborar los primeros modelos en 3D del sistema, manteniendo reuniones frecuentes para dejar claras las condiciones de diseño, las que serían fijas para iniciar así con el diseño crítico.

Esta fue sin duda la parte de mi trabajo que más tiempo, errores, correcciones y dudas me costó. Al momento de poner en marcha los cálculos analíticos de todos los componentes de nuestro sistema, es cuando el ojo crítico de un ingeniero (o futuro ingeniero) debe sobresalir, ya que siempre se presentarán resultados que a simple vista sean absurdos, lo que le lleva a uno a repetir una y otra vez los procedimientos hasta encontrar la causa raíz de la incongruencia. El siguiente paso, por el contrario, puede ser considerado como el más sencillo tal vez de todo el proyecto de tesis. Se puede decir esto, ya que la realización de modelos paramétricos consiste básicamente en la adición de dimensiones exactas y demás detalles a los modelos 3D que ya fueron desarrollados en el diseño preliminar, y en muy pocas ocasiones hacer ciertos cambios prácticamente imperceptibles para alguien ajeno al trabajo en sí.

Finalmente, teniendo ya las dimensiones y especificaciones necesarias para declarar al diseño como finalizado, procedí inmediatamente a conseguir los materiales para la construcción del prototipo. En esta ocasión podría decir que fui muy afortunado al tener compañeros que en semestre anteriores tuvieron que desarrollar proyectos por separado, ya sea de hidráulica, turbo maquinaria o transferencia de calor, por lo que su referencia sobre fabricantes y distribuidores fue de gran ayuda. Es así como adquirí las tuberías de PVC de Plastigama, la manguera, la válvula de anti retorno y la bomba periférica en Mega Kiwi de la Avenida Eloy Alfaro, al norte de Quito. Mientras tanto, las resistencias eléctricas, compuestas de Cromo Níquel, fueron adquiridas en la microempresa Resistencias Eléctricas Ohmio, y el

recipiente utilizado para el tanque fueron provistas sin costo alguno por Implá S.A., estas dos últimas ubicadas en el sur de Quito, cerca de la estación de ferrocarril de Chimbacalle.

Con los materiales ya disponibles, fue cuestión de tres días completos para concretar la construcción y armado del sistema en el Taller de Ingeniería Mecánica de la USFQ, en el subsuelo del edificio Maxwell. Debido al corto tiempo con el contaba para finalizar el trabajo, todo el escrito del documento de tesis fue realizado paralelamente con el resto del desarrollo, de modo que no se considere ningún tipo de atraso por la redacción del mismo, que fue revisado paulatinamente a medida que avanzaba.

Como últimas dos actividades realizadas, fueron la presentación de rigor para el seguimiento de proyectos de tesis frente a mi director y un profesor adicional, y finalmente la realización de la presentación final del trabajo, con la ayuda de una gran cantidad de ilustraciones y otros tipos de material didáctico, que fue presentada en el día de la defensa, en el que la satisfacción por haber realizado este proyecto se completó.

4.2 Análisis del resultado final

Para analizar los resultados de este proyecto de tesis, es necesario separar lo que fue el diseño del sistema de lo que fue la construcción del prototipo. Esto se debe únicamente a la separación que se realizó también a lo largo del desarrollo de ambos, siendo considerados partes independientes del cuerpo de tesis.

Empezaremos con el diseño elaborado del sistema en general. Tras observar las ilustraciones gráficas que hemos realizado, podemos analizar el modelo como un producto

sumamente amigable, tanto con el usuario como con sus alrededores, es decir con las instalaciones con las que se cuentan previamente. El impacto hacia estas resulta mínimo, prácticamente nulo dependiendo del tipo de ducha en el que se lo instale, y su disposición dentro de la misma evita incomodar al usuario, ya que se ubicaría en lugares donde el agua casi no llega de manera directa. En cuanto a los resultados del diseño crítico se puede decir que son totalmente coherentes y que se adhieren a la realidad de consumo, tanto de agua como de electricidad. Hemos propuesto un consumo de agua de 3 GPM, recomendado incluso por el International Plumbing Code (IPC), lo que asegura mantener un caudal adecuado, y común en la mayor parte de duchas. Adicionalmente se ha obtenido en los resultados un consumo energético alrededor de 7 A (amperios), que se puede comparar incluso con la energía requerida para funcionar de una tostadora de cocina. Asimismo, las dimensiones tanto del impeller de la bomba, como de los cables eléctricos resistivos, son totalmente apropiadas para instalaciones de este tipo, por lo que nos ha dejado completamente satisfechos. Los resultados obtenidos, de igual forma, en el cálculo hidráulico están totalmente acorde a las condiciones de trabajo del sistema, por lo que nos pone igualmente tranquilos y satisfechos con el procedimiento realizado.

El prototipo por su parte, sin grandes dificultades presentadas al momento de su construcción y ensamble, ha cumplido a plenitud con la función para lo que fue concebido: demostrar prácticamente el concepto de funcionamiento del sistema de recirculación y recalentamiento de agua. De igual manera, los costos esperados para cumplir con este objetivo eran considerablemente más altos de lo que resultaron, por lo que en un futuro, podrían incluso disminuir más, para generar mayor atracción comercial para el producto. Cabe resaltar, que en este país la disponibilidad de materiales es bastante limitada, sin embargo, hay

muchísimas alternativas que no son conocidas en el medio, y que deben ser exploradas con un poco de esfuerzo.

La única vicisitud que se presentó al probar cada componente e integrarlos en el sistema global, fue la poca resistencia mostrada por el primer recipiente conseguido para hacerlo funcionar de tanque calentador. El material del mencionado primer recipiente fue poliuretano, sin embargo, su rigidez no era la esperada, y la vuelta y media de rosca que sujetaba a la tapa superior era totalmente insuficiente. Es por esta razón, que para evitarnos trabajar el sistema al límite, procedimos a sustituir el tanque por un tubo grueso de 3 pulgadas de PVC con tapas superior e inferior del mismo material. El realizar este cambio, el funcionamiento del prototipo del sistema de recirculación y recalentamiento de agua resultó completamente satisfactorio.

El factor principal que se tomó en cuenta para la evaluación del prototipo resultante fue la temperatura que alcanzaba el agua y a la que se mantenía en estado estable. Dicha temperatura fue de un rango entre 28 y 30 °C. Sin embargo es muy importante mencionar que se lograba este calentamiento a partir de la temperatura a la que llega el agua proveniente del servicio público, es decir aproximadamente 16 °C, lo cual nos indica que el gradiente ha sido cubierto fácilmente, y un pequeño ajuste en los parámetros de funcionamiento, garantizaría que el sistema cumpla con todos los requerimientos técnicos establecidos desde un inicio.

4.3 Conclusiones

Vale iniciar este subcapítulo de la tesis, declarando con total sinceridad la incredulidad que me acecha al observarme escribiendo ya las conclusiones a las que he llegado luego de realizar todo el proyecto, cuatro meses después de su inicio.

Afortunadamente, las conclusiones que se van a mencionar son todas positivas y que acrecientan la satisfacción que me ha dejado el haber realizado este trabajo, conjuntamente con mi profesor asesor. Más que nada el pensar que hemos aportado con una tesis que apoya la conciencia ambientalista y de un trato y administración responsables de los recursos naturales, creo yo es lo que más dichoso me hace sentir.

Como conclusión general de este aspecto, se puede decir que la veracidad de los números incluidos a lo largo del documento, y especialmente en los anexos de consumo y estudios financieros, le agregan un valor gigantesco a este trabajo. Me satisface sobremanera saber que aquél cliente que se decida instalar este sistema en su hogar, no solo ahorrará dinero, sino que sabrá a ciencia cierta que está aportando con un granito de arena para la conservación del medio ambiente, ahorrando agua que puede ser utilizada en actividades mucho más importantes para la vida humana.

Aparte de esa conclusión principal que se ha mencionado, también podríamos decir que fue una gran idea el adentrarme en este tema, debido al amplio campo de investigación con el que me empapé, abarcando tres de las cuatro principales ramas de la Ingeniería Mecánica: energía, materiales y diseño.

Sin embargo, todo esto en muchas ocasiones queda en palabras, por lo que se debe tener un asesoramiento adecuado para la aplicación práctica de los conocimientos teóricos que se aprendieron a lo largo de la carrera. Como principal ejemplo de esta conclusión que

mencionamos, y que fue el mayor problema al momento de realizar el diseño, es el saber si se podrá cumplir con los requerimientos técnicos establecidos, por la simple incertidumbre de que existan o no ciertos tipos de materiales y equipos en nuestro mercado.

Por último, puntualizaremos cada una de las conclusiones técnicas específicas a las que hemos llegado a lo largo de todo el trabajo:

- Los recursos hídricos a nivel nacional e internacional son suficientes para cubrir la demanda humana, sin embargo, están pesimamente distribuidos, lo que causa una gran escasez especialmente en sectores marginados.
- De acuerdo a los datos obtenidos en las visitas a hogares quiteños, el sector socioeconómico que cumplirá el rol de potencial cliente de nuestro sistema, es el de clases alta y media-alta.
- El flujo de agua a través de las tuberías de las duchas es siempre turbulento.
- Es siempre recomendable cumplir con los cálculos hidráulicos de pérdida de carga en tuberías para seleccionar adecuadamente el diámetro nominal de las mismas, así como para establecer el punto de diseño de la bomba a utilizar.
- El gradiente de temperatura que debe abarcar el tanque calentador de nuestro sistema es menor al de aquél que debe calentar el agua proveniente de la calle.
- Es factible jugar con los parámetros de longitud y diámetro del cable eléctrico resistivo que calentará el agua que pase a través del calentador, para aumentar o disminuir el

amperaje que consume el mismo, sin embargo, siempre será más conveniente utilizar los valores óptimos que se han determinado en los cálculos.

- El material y componente fundamental en el que no se deben escatimar gastos ni esfuerzo al momento del ensamble y la construcción del prototipo o de los productos a comercializar en un futuro, son los sellos de hermeticidad entre tanque, bomba y el medio ambiente, riesgo principal de accidentes.

4.4 Recomendaciones

Para emitir cualquier tipo de recomendaciones habría que primero especificar hacia quien van dirigidas, por lo que segmentaremos este subcapítulo en varias partes.

En primer lugar, y como cualquier tipo de producto que busca ingresar en el mercado, más aun en calidad de pionero, empezaremos dando algunas recomendaciones a los clientes directos, así como a los distribuidores que en algún momento deseen tomar parte en la comercialización del sistema.

Como se ha podido observar a lo largo del documento, se trata de un diseño bastante elaborado pero sin mayores complicaciones al momento de su instalación, por lo que se debe mantener esta imagen siempre válida, es por esto que los requerimientos técnicos deben ser respetados en su totalidad y sin excepciones, especialmente al momento de evaluar el impacto que tendrá la instalación del sistema en una construcción existente. De igual modo, se recomienda sobremanera seguir al pie de la letra los sencillos planes de mantenimiento que

fueron detallados en el subcapítulo 3.10, para asegurar así una larga vida útil de los equipos y, más que nada, evitar cualquier tipo de contratiempos o accidentes con el usuario.

Por otro lado, los académicos, profesores, asistentes de cátedra o investigadores en general que se interesen por este proyecto de tesis, deben mantener el enfoque primordial de este trabajo, que es la solución científica hacia una problemática universal como lo es el mal uso de muchos recursos naturales. Con esto hacemos un énfasis a la importancia de impulsar a los alumnos a realizar aportes (pequeños o grandes) para el mejor cuidado del medio ambiente, de modo que se cree una cultura de desarrollo sostenible en todos los campos de la carrera de Ingeniería Mecánica o en cualquier otra Ingeniería, tal como se lo hace en las grandes potencias europeas.

Por último, podríamos realizar algunas breves recomendaciones a los alumnos que se encuentran todavía cursando las clases de pregrado, y que tal vez están por empezar con su respectivo proyecto de tesis.

Sin lugar a dudas la organización y el orden que se tenga al momento de desarrollar un trabajo académico es de suma importancia, el hecho de mantener cada idea de avance o avance en concreto documentado es indispensable para no perder el hilo del asunto. Cuando ya se empiece con el diseño en sí de algún tipo de sistema, maquina o adaptación ingenieril a algún proceso industrial, es de total competencia de los autores no dar nada por sobreentendido y dejar siempre claro cuáles han sido las razones y los caminos por los que se ha dado el progreso del trabajo. Se debe tener en cuenta siempre, que un trabajo académico, especialmente una tesis de grado, estará al alcance de cualquier individuo, sea o no afín con la carrera en cuestión, y que el documento debe ser comprensible para todos. Como última

recomendación que podríamos destacar, es el hecho de pensar siempre en todas las opciones y escenarios posibles en el caso de elegir cualquier alternativa de diseño. Con esto me refiero a que los imprevistos estarán a la orden del día, por lo que no se deben dejar ningún tipo de cabos sueltos, para de esta manera garantizar un trabajo de calidad, que se mantenga siempre como un ejemplo para las generaciones venideras.

5. Bibliografía

- [1] Dr. Ing. Remigio Galarraga Sánchez, Estado y Gestión de los Recursos Hídricos en el Ecuador, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1999.
- [2] Ávila Alexandra, Hay 62.500 litros diarios de agua por habitante, pero existe escasez, Diario El Universo, 20/09/2009, <http://www.eluniverso.com/2009/09/20/1/1447/hay-litros-diarios-agua-habitante-existe-escasez.html>.

- [3] Europa Press, El consumo de agua, Natura – Medio Ambiental, Zaragoza, Febrero 2008, <http://sine-die.blogspot.com/2008/02/el-consumo-de-agua.html>.
- [4] Sitio Web Oficial de Quench Showers: <http://www.quenchshowers.com/home.asp>
- [5] Pedro Fernández Díez, Bombas Centrífugas y Volumétricas, <http://libros.redsauce.net/>.
- [6] Bomba sumergible: http://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_sumergible.
- [7] Bombas Centrífugas: <http://www.doschivos.com/trabajos/Tecnologia/720.htm>.
- [8] Cengel Yunus y Boles Michael, Termodinámica, Mc Graw Hill, 5ta. Edición, México D.F., 2007.
- [9] White M. Frank, Fluid Mechanics, Mc Graw Hill International, 5th Edition, 2003.
- [10] Incropera Frank, DeWitt David, Bergman Theodore, Lavine Adrienne, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, 6th Edition, 2007.
- [11] Crane Frederick, Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, Mc Graw Hill, 1era. Edición, México D.F., 1989.
- [12] Peng William, Fundamentals of Turbomachinery, John Wiley & Sons, 1st Edition, 2008.
- [13] Sass Laurent, Diapositivas de clase: Actuadores y Control Lógico, USFQ, Segundo Semestre 2009/10.
- [14] International Plumbing Code Handbook, 2008.
- [15] Guerrero Víctor, Notas de clase: Elementos Finitos, USFQ, Primer Semestre 2009/10.

[16] Villalba Luis, Bomba centrífuga en 3d en formato dwg., http://grupos.emagister.com/documento/bomba_centrifuga_en_3d/1026-154021.

[17] U.S. Energy Information Administration, Form EIA-826, “Monthly Electric Sales and Revenue Report with State Distribution Report”, 2010.

[18] Public Service Commission of Wisconsin, Wisconsin Water Fact Sheet, 2010.

[19] Descripción y tablas de emisividad de Ampere, México D.F., 2008.

[20] www.plastigama.com.ec

[21] <http://patentados.com/invento/filtro-para-agua-de-riego-y-potable.html>

[22] Cristóbal Escobar Félix Willy, Descripción Hidráulica de la Batería de Filtros de Planta No. 1 de la Atarjea, UNMSM, Lima, 2005.

[23] Rivas Alejandro y Sánchez Gorka, Pérdidas de Carga en los Componentes de las Instalaciones Hidráulicas, Universidad de Navarra Escuela Superior de Ingenieros, San Sebastián, 2007-2008.