



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E S C I E N T I A H O M I N I S S A L U S "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

**Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.**

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS**

### **FORMULACIÓN DE UNA METODOLOGÍA TEÓRICO – PRÁCTICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO DE BOMBAS, MEDIANTE SIMULACIONES EN MATLAB**

#### **PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN ELECTROMECAÁNICA**

**DALGO SÁNCHEZ CARLOS ANDRÉS**

**(carlos.dalgo@epn.edu.ec)**

**LOACHAMÍN MUZO LENIN ALEXANDER**

**(lenin.loachamin@epn.edu.ec)**

**DIRECTOR: ING. ESTEBAN JAVIER JATIVA POZO**

**(esteban.jativa@epn.edu.ec)**

**CODIRECTOR: ING. CARLOS ORLANDO ROMO HERERA**

**(carlos.romo@epn.edu.ec)**

**Quito, Junio 2017**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Carlos Andrés Dalgo Sánchez y Lenin Alexander Loachamín Muzo, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional, y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Carlos Andrés Dalgo Sánchez

---

Lenin Alexander Loachamín Muzo

## CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Carlos Andrés Dalgo Sánchez y Lenin Alexander Loachamín Muzo, bajo nuestra supervisión.

---

Ing. Esteban Javier Játiva Pozo  
DIRECTOR DEL PROYECTO

---

Ing. Carlos Orlando Romo Herrera  
CO-DIRECTOR DEL PROYECTO

## **AGRADECIMIENTO**

**Carlos Andrés Dalgo Sánchez**

## **AGRADECIMIENTO**

**Lenin Alexander Loachamín Muzo**

## **DEDICATORIA**

**Carlos Andrés Dalgo Sánchez**

## **DEDICATORIA**

**Lenin Alexander Loachamín Muzo**

## CONTENIDO

|   |            |
|---|------------|
| <b>RESUMEN .....</b>  | <b>XIV</b> |
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>   | <b>XV</b>  |
| <b>CAPÍTULO 1 .....</b>   | <b>1</b>   |
| <b>EL PROBLEMA .....</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....  | 1          |
| 1.1 FORMULACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA .....                                  | 1          |
| 1.1.1 FORMULACIÓN .....   | 1          |
| 1.1.2 SISTEMATIZACIÓN .....   | 2          |
| 1.2 OBJETIVOS .....   | 3          |
| 1.2.1 OBJETIVO GENERAL .....  | 3          |
| 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....  | 3          |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN .....   | 4          |
| 1.4 ALCANCE.....  | 5          |
| 1.5 RESEÑA HISTÓRICA.....   | 5          |
| 1.5.1 RESEÑA HISTÓRICA SOBRE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS .....                             | 5          |
| 1.5.2 RESEÑA HISTÓRICA DE SISTEMAS DE CONTROL .....                                   | 8          |
| 1.6 MARCO CONCEPTUAL .....  | 9          |
| <b>CAPÍTULO 2 .....</b>   | <b>11</b>  |
| <b>SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE SISTEMAS DE CONTROL.....</b>                              | <b>11</b>  |
| 2.1 MARCO TEÓRICO .....   | 11         |
| 2.2 BOMBAS DE RECIRCULACIÓN .....   | 14         |
| 2.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS.....                                  | 19         |
| 2.2.2 SISTEMAS DE BOMBAS EN PARALELO.....   | 20         |
| 2.2.3 APLICACIONES DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS.....                                     | 24         |
| 2.3 ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LOS<br>SISTEMAS DE FLUJO ..... | 27         |
| 2.3.1 DINÁMICA ESPECÍFICA DE LOS SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN .....                      | 32         |
| 2.4 SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO.....   | 34         |

|                                     |   |           |
|-------------------------------------|---|-----------|
| 2.4.1                               | ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE CONTROL .....  | 37        |
| 2.4.2                               | CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA EN LAZO ABIERTO Y CERRADO ....                                  | 38        |
| 2.5                                 | SOFTWARE MATLAB .....   | 40        |
| <b>CAPÍTULO 3.....</b>              |   | <b>41</b> |
| <b>PROPUESTA METODOLÓGICA .....</b> |   | <b>41</b> |
| 3.1                                 | METODOLOGÍA.....  | 41        |
| 3.2                                 | FORMULACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....  | 41        |
| 3.2.1                               | SELECCIÓN DEL PROCESO A SIMULAR.....  | 41        |
| 3.2.1.1                             | Sistemas de recirculación para una caldera .....  | 42        |
| 3.2.1.2                             | Sistema de agua caliente sanitaria .....  | 43        |
| 3.2.1.3                             | Sistema de calefacción.....   | 46        |
| 3.2.2                               | SELECCIÓN DEL PROCESO .....   | 48        |
| 3.3                                 | SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES .....  | 50        |
| 3.3.1                               | SELECCIÓN DE LA CALDERA.....  | 51        |
| 3.3.2                               | SELECCIÓN DE LA BOMBA DE RECIRCULACIÓN .....  | 51        |
| 3.3.3                               | SELECCIÓN DE LA MEDICIÓN DE CAUDAL .....  | 54        |
| 3.3.4                               | SELECCIÓN DE LA VÁLVULA DE CONTROL .....  | 54        |
| 3.3.5                               | SELECCIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA E INTERCAMBIADOR<br>DE CALOR.....                     | 55        |
| 3.4                                 | FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA EL SISTEMA DE<br>CALEFACCIÓN.....                           | 59        |
| 3.4.1                               | FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA LA BOMBA DE<br>RECIRCULACIÓN.....                           | 59        |
| 3.4.2                               | FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA VÁLVULA DE CONTROL .....                                   | 61        |
| 3.4.3                               | FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SENSOR DE TEMPERATURA ...                                    | 63        |
| 3.4.4                               | FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.                                     | 63        |
| 3.4.5                               | FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL CONTROLADOR.....   | 65        |
| 3.4.6                               | FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SENSOR DE CAUDAL .....                                       | 67        |
| 3.5                                 | ANÁLISIS Y RESULTADOS .....   | 68        |
| 3.5.1                               | RESULTADOS DEL SISTEMA DE CONTROL EN LAZO ABIERTO .....                                   | 68        |
| 3.5.2                               | RESULTADOS DEL SISTEMA DE CONTROL EN LAZO CERRADO CON<br>UNA BOMBA DE RECIRCULACIÓN ..... | 71        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.5.3 RESULTADOS DEL SISTEMA DE CONTROL EN LAZO CERRADO PARA BOMBAS EN PARALELO ..... | 73        |
| 3.5.4 ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL CONTROLADOR CON EL SISTEMA DE LAZO CERRADO .....      | 75        |
| 3.5.5 CONCLUSIONES DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA.....                                  | 84        |
| <b>CAPÍTULO 4 .....</b>   | <b>87</b> |
| <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>   | <b>87</b> |
| 4.1 CONCLUSIONES .....  | 87        |
| 4.2 RECOMENDACIONES.....  | 88        |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>  | <b>89</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>   | <b>94</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.1</b> Representación de la bomba de tornillo de Arquímedes (WILO, 2010)  | 6  |
| <b>Figura 1.2</b> Diseño y Construcción de la primera bomba de recirculación (WILO, 2010) .....                            | 7  |
| <b>Figura 2.1</b> Clasificación de las Bombas (VIEJO & ÁLVAREZ, 2004) .....  | 13 |
| <b>Figura 2.2</b> Bomba instalada para elevar agua en un Sistema Abierto (WILO, 2010) .....                                | 15 |
| <b>Figura 2.3</b> Bomba instalada para la circulación de calefacción en un Sistema Cerrado (WILO, 2010) .....              | 15 |
| <b>Figura 2.4</b> Elementos principales de las bombas centrífugas (IDAE, 2012) .....                                       | 16 |
| <b>Figura 2.5</b> Tipos de rodetes (WILO, 2010) .....  | 17 |
| <b>Figura 2.6</b> Bomba Centrífuga con difusor (UNET, 2005) .....  | 17 |
| <b>Figura 2.7</b> Sección de motor Eléctrico (ASSETS, 2010) .....  | 18 |
| <b>Figura 2.8</b> Punto de trabajo de la bomba (D). Curva característica de la tubería de impulsión (GRUNDFOS, 2013) ..... | 19 |
| <b>Figura 2.9</b> Curva característica del Sistema de bombas en paralelo (GRUNDFOS, 2013) .....                            | 21 |
| <b>Figura 2.10</b> Curva característica operando con bombas idénticas en paralelo (GRUNDFOS, 2013) .....                   | 21 |
| <b>Figura 2.11</b> Curva característica operando con bombas diferentes en paralelo (GRUNDFOS, 2013) .....                  | 22 |
| <b>Figura 2.12</b> Instalación de bombas en paralelo (WILO, 2010) .....  | 23 |
| <b>Figura 2.13</b> Operación de bombas en paralelo con variadores de velocidad (ZERQUERA & SÁNCHEZ, 2010) .....            | 24 |
| <b>Figura 2.14</b> Elementos principales de las bombas centrífugas (IDAE, 2012) .....                                      | 24 |
| <b>Figura 2.15</b> Sistema de Bombeo de tanque a tanque (WEKKER, 2004) .....   | 25 |
| <b>Figura 2.16</b> Cabezal de riego (FERNANDES & GONZÁLEZ, 2014) .....   | 26 |
| <b>Figura 2.17</b> Bombas iguales conectadas en paralelo (FERNANDES & GONZÁLEZ, 2014) .....                                | 26 |
| <b>Figura 2.18</b> Energías de una bomba centrífuga (IDAE, 2012) .....   | 31 |
| <b>Figura 2.19</b> Curva de la Instalación. Relación entre altura y caudal (IDAE, 2012) .....                              | 32 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 2.20</b> Punto de operación de la bomba en un Sistema de Recirculación (IDAE, 2012).....                       | 33 |
| <b>Figura 2.21</b> Comportamiento real del Punto de Operación de la Bomba (IDAE, 2012) .....                             | 33 |
| <b>Figura 2.22</b> Sistemas de Control a Lazo Abierto (NISE, 2011).....  | 38 |
| <b>Figura 2.23</b> Sistemas de Control a Lazo Cerrado (NISE, 2011) .....   | 39 |
| <b>Figura 3.1</b> Sistema de recirculación para caldera (Dalgo y Loachamín) .....  | 42 |
| <b>Figura 3.2</b> Sistema de control para la recirculación en una caldera (Dalgo y Loachamín) .....                      | 43 |
| <b>Figura 3.3</b> Reglamentación de Distribución de ACS (RENEDO, 2015).....  | 44 |
| <b>Figura 3.4</b> Conexiones necesarias en acumuladores e interacumuladores (ATECYR, 2010) .....                         | 45 |
| <b>Figura 3.5</b> Instalación de Calefacción Doméstica con Regulación de Temperatura (IDAE, 2012).....                   | 46 |
| <b>Figura 3.6</b> Regulación de Temperatura (RENEDO, 2015) .....   | 48 |
| <b>Figura 3.7</b> Sistema de Calefacción mediante Diagramas de Bloques (Dalgo y Loachamín) .....                         | 50 |
| <b>Figura 3.8</b> Caldero Industrial (BOSCH, 2016) .....   | 51 |
| <b>Figura 3.9</b> Curva Característica de la Bomba AP de Caudal vs Altura y Caudal vs Potencia (BOMBASIDEAL, 2017) ..... | 52 |
| <b>Figura 3.10</b> Sensor de Caudal (MARQUEZ, 2014).....   | 54 |
| <b>Figura 3.11</b> Válvula de Control de tres vías “mezcladora” (BELIMO, 2016) .....                                     | 55 |
| <b>Figura 3.12</b> Radiador B3 800/100 (ROINTE, 2016).....   | 56 |
| <b>Figura 3.13</b> Longitud y Diámetros de Tuberías del Sistema de Calefacción (IDAE, 2012) .....                        | 58 |
| <b>Figura 3.14</b> Curva característica de la Bomba Centrífuga (PRIAS, 2002).....  | 59 |
| <b>Figura 3.15</b> Curva Característica de la Bomba AP - Caudal vs Potencia (BOMBASIDEAL, 2017) .....                    | 61 |
| <b>Figura 3.16</b> Sintonización del controlador PID con Simulink (Dalgo y Loachamín) .....                              | 67 |
| <b>Figura 3.17</b> Ajuste del Sistema Robusto (Dalgo y Loachamín) .....  | 67 |
| <b>Figura 3.18</b> Sistema en Lazo Abierto para 8 Radiadores (Dalgo y Loachamín) ..                                      | 68 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 3.19</b> Respuesta de Caudal y Temperatura ante una señal paso unitario en Lazo Abierto para el radiador de 1.1 y 1.32 kW (Dalgo y Loachamín) .....   | 69 |
| <b>Figura 3.20</b> Sistema en Lazo Abierto para 2 Radiadores Equivalentes (Dalgo y Loachamín) .....   | 70 |
| <b>Figura 3.21</b> Respuesta de Temperatura ante una señal paso unitario en Lazo Abierto para el radiador equivalente de 4.4 y 5.28 kW (Dalgo y Loachamín)..... | 70 |
| <b>Figura 3.22</b> Sistema en Lazo Cerrado para 8 Radiadores (Dalgo y Loachamín)  | 71 |
| <b>Figura 3.23</b> Valor en estado estable del sistema con una bomba de recirculación para el radiador de 1.1 y 1.32 kW (Dalgo y Loachamín) .....               | 72 |
| <b>Figura 3.24</b> Sistema en Lazo Cerrado para 8 Radiadores con 2 bombas (Dalgo y Loachamín) .....   | 73 |
| <b>Figura 3.25</b> Valor en estado estable del sistema con dos bombas de recirculación para el radiador de 1.1 y 1.32 kW (Dalgo y Loachamín) .....              | 74 |
| <b>Figura 3.26</b> Controladores PID para Caudal y Temperatura con 1 y 2 Bombas de Recirculación para radiadores de 1.1 y 1.32 KW (Dalgo y Loachamín) .....     | 75 |
| <b>Figura 3.27</b> Respuesta de Caudal con controlador proporcional (Dalgo y Loachamín) .....   | 76 |
| <b>Figura 3.28</b> Salida de Temperatura con Sintonización PID para un radiador de 1.1 kW (Dalgo y Loachamín).....  | 78 |
| <b>Figura 3.29</b> Salida de Temperatura con Sintonización PI para un radiador de 1.1 kW (Dalgo y Loachamín).....   | 79 |
| <b>Figura 3.30</b> Salida de Temperatura con Sintonización PID para un radiador de 1.32 kW (Dalgo y Loachamín) .....  | 80 |
| <b>Figura 3.31</b> Salida de Temperatura con Sintonización PI para un radiador de 1.32 kW (Dalgo y Loachamín).....  | 81 |
| <b>Figura 3.32</b> Modificación en la función de transferencia del sensor de temperatura (Dalgo y Loachamín) .....  | 82 |
| <b>Figura 3.33</b> Salida de Temperatura con Sintonización PI y PID para los radiadores (Dalgo y Loachamín) .....   | 83 |
| <b>Figura 3.34</b> Ingreso de la Función de Transferencia (Dalgo y Loachamín) .....   | 85 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 3.1</b> Selección del Proceso (PUENTES, 2016) .....  | 49 |
| <b>Tabla 3.2</b> Características de la Válvula TR24-SR-T US (BELIMO, 2016).....   | 55 |
| <b>Tabla 3.3</b> Modelo de Radiadores (ROINTE, 2016) .....  | 56 |
| <b>Tabla 3.4</b> Tuberías para Agua Caliente y Fría (PLASTIGAMA, 2016).....   | 58 |
| <b>Tabla 3.5</b> Valores <b>K<sub>v</sub></b> en función de la Potencia del Radiador .....                                | 62 |
| <b>Tabla 3.6</b> Respuesta de Salida en el Sistema de Lazo Abierto (Dalgo y Loachamín) .....                              | 70 |
| <b>Tabla 3.7</b> Respuesta de Salida en el Sistema de Lazo Cerrado con una Bomba (Dalgo y Loachamín) .....                | 72 |
| <b>Tabla 3.8</b> Respuesta de Salida en el Sistema de Lazo Cerrado con 2 Bombas de Recirculación (Dalgo y Loachamín)..... | 74 |
| <b>Tabla 3.9</b> Constante Proporcional para el control de caudal (Dalgo y Loachamín) .....                               | 76 |
| <b>Tabla 3.10</b> Constantes PID para el control de temperatura (Dalgo y Loachamín).....                                  | 77 |

## RESUMEN

El presente tema de tesis se ha dividido en cuatro capítulos los cuales se detallan brevemente a continuación:

El Primer Capítulo contiene el proceso general para el desarrollo del presente tema, justificando todos los aspectos para representar el modelo del trabajo de investigación.

En el Segundo Capítulo se encuentra el marco teórico. Además, describe de manera general todos los argumentos teóricos necesarios para el trabajo de investigación.

En el Tercer Capítulo se expone la metodología, interpretación y análisis de resultados para el proyecto de investigación. Así como también, se consideran métodos, técnicas de investigación, funciones de transferencia para llevar a cabo el proceso de control automático del sistema y controladores. Además, se estudiará varios modelos y mediante la técnica de factores ponderados, se elegirá el proceso a estudiar.

Por último, se incluyen las conclusiones y recomendaciones finales con respecto al desarrollo del proyecto de investigación.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación describe el desarrollo de un sistema de control automático basado en un sistema de calefacción doméstica, el cual consta de: bombas de recirculación, válvulas de control (actuadores), sensores de temperatura y caudal (realimentación), controladores PID e intercambiadores de calor (planta). Es un sistema no lineal y para poder representar este proceso, se debe linealizar, modelar y sacar sus funciones de transferencia. Para dicho análisis y su respectivo control en lazo cerrado, se utilizarán herramientas basadas en la plataforma de simulación "Simulink" de Matlab. Una de las facilidades de este software, es realizar simulaciones de sistemas de control automático mediante plataformas de procesamiento digital, previo a una futura implementación del sistema, permitiendo garantizar la confiabilidad del proceso.

Durante el desarrollo del sistema, se obtendrán gráficas de las señales de salida emitidas por las bombas y radiadores, con la finalidad de visualizar los sistemas en lazo cerrado del proceso. Mediante el uso de técnicas de control, se puede ver los efectos que producen los controladores del sistema, los mismos que se encargan de controlar la cantidad de agua necesaria a los radiadores y obtener una temperatura que permita operar con seguridad. Además, podrá ser utilizada como base para próximos estudios, en los que se desee profundizar sobre este tipo de sistemas de control.

# **CAPÍTULO 1**

## **EL PROBLEMA**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La automatización es un proceso que amerita especialización de parte de los profesionales de la Electromecánica, por lo que esta ciencia técnica requiere desarrollar nuevas metodologías que apoyen la aplicación de diseño de sistemas de control. El control de las bombas tiene enorme importancia debido a sus aplicaciones en todo tipo de instalaciones tanto domiciliarias como industriales. Sin embargo, es un tópico poco estudiado que merece un análisis detallado, apoyado en modelos matemáticos y cálculos numéricos de vanguardia.

Esto, requiere de la incorporación de las herramientas informáticas como el software Matlab, que simula y predice el comportamiento de Bombas bajo una determinada circunstancia. El presente proyecto busca proponer un método teórico-práctico para la simulación de bombas funcionando como actuadores de un sistema de control automático, especialmente en una de sus aplicaciones más extendidas como lo es el sistema de recirculación, y un sistema de bombas en paralelo, utilizando el software matemático Matlab.

### **1.2 FORMULACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA**

#### **1.2.1 FORMULACIÓN**

¿Qué procedimientos se requieren ejecutar para simular sistemas de control automáticos de bombas de recirculación y de sistema de bombas en paralelo, haciendo uso del lenguaje de programación y plataforma Matlab?

### 1.2.2 SISTEMATIZACIÓN

- ¿Qué ecuaciones gobiernan la dinámica de sistemas que representan la operación de bombas de recirculación y la operación de bombas funcionando en paralelo?

Se determina mediante la ecuación de Bernoulli porque relaciona los cambios de presión, velocidad y altura entre dos puntos de una tubería. Y con la aplicación de la energía mecánica sobre una bomba se determinará el punto de operación de la bomba o bombas en paralelo.

- ¿Cuáles son los requerimientos más generalizados para el diseño e implementación de sistemas automáticos donde intervienen bombas de recirculación y sistemas de bomba en paralelo?

Los requerimientos dependen de cómo se va a definir el estudio del sistema a implementar. Se determina elementos de forma mecánica y eléctrica para determinar las funciones de transferencia y variables de medición (caudal, temperatura, presión, etc) para utilizar controladores a dichas variables.

- ¿Qué capacidad ofrece el software Matlab para el diseño o análisis de sistemas de control automático?

La capacidad que ofrece Matlab es que el estudiante sea capaz de visualizar el comportamiento del sistema y poder sintetizar controladores para sistemas de control; a tal manera que estos lazos cumplan con las exigencias dinámicas y estáticas dadas. Estos a su vez, pueden ser implementados usando dispositivos electrónicos.

- ¿Qué variables permiten el control automático de los sistemas de recirculación?  
¿Qué variables permiten el control automático de los sistemas de bombas operando en paralelo?

La variable principal para el sistema para bombas de recirculación es el caudal, ya que permite dar una medición durante el periodo de tiempo. En caso de un aumento de caudal mediante la colocación de bombas en paralelo pasa el mismo

resultado anterior para la medición. Por lo cual, se debe colocar un controlador para que no exceda o haya una falta de caudal en el sistema.

- ¿Qué resultados se obtendrán después de la simulación?

El objetivo de la simulación es establecer controladores que compensen el sistema y su error en estado estable sea cercano ( $<5\%$ ) o igual a cero.

- ¿Cuál es la metodología para diseñar y simular el control automático tanto de sistemas de recirculación como de sistemas de bombas en paralelo?

Mediante el método deductivo se realiza el diseño de sistemas de control automático, ya que conlleva a conocer el planteamiento del problema, elección del modelo a simular, determinación de parámetros expresados en funciones de transferencia, implementación y simulación del sistema sin/con controladores.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Formular una metodología teórico-práctica para el diseño de sistemas de control automático de bombas, mediante simulaciones en Matlab.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar el marco teórico que permita representar la dinámica física que gobierna la operación de las bombas.
- Estudiar un marco teórico para entender la esencia de un sistema de control automático.
- Investigar las herramientas de Matlab que permiten diseñar y simular sistemas de control.
- Diseñar un sistema de control automático para una bomba de recirculación que actúa en un lazo cerrado simple.

- Desarrollar un sistema de control para un sistema de bombas operando en paralelo.
- Simular los sistemas de control automático diseñados con el software Matlab. Analizar los resultados utilizando gráficas y cálculos numéricos generados por el sistema.
- Enunciar la metodología desarrollada.

## **1.4 JUSTIFICACIÓN**

Las bombas se utilizan para impulsar líquido a través de tuberías y forman parte de la mayoría de los sistemas hidráulicos, los cuáles son indispensables en la operación de los equipos pesados que hoy en día se utilizan a lo largo de todas las industrias o servicios públicos.

Los tecnólogos e ingenieros deben tener la capacidad para especificar y seleccionar las bombas adecuadas que satisfagan los requerimientos del sistema, ya sea para uso industrial, agrícola o residencial. También se necesita diseñar sistemas, para lo cual se amerita un estudio de los parámetros principales de la bomba, tales como la presión de proceso, la velocidad de bombeo, el tipo de fluido a bombear, entre otros, asegurando además la estabilidad del sistema. Todas estas tareas se corresponden con la etapa de análisis y diseño de sistemas de control de bombas.

La formulación de un método para aplicar el software Matlab en la simulación de sistemas de control para bombas, permitirá al profesional electromecánico contar con una poderosa herramienta para el diseño de sistemas de control de instalaciones de bombeo. El presente estudio es un aporte para la comprensión tanto de las instalaciones donde participan las bombas de recirculación, como de aquellas donde funcionan las bombas en paralelo, y representa una aproximación novedosa que cuenta con pocos antecedentes en el área.

## 1.5 ALCANCE

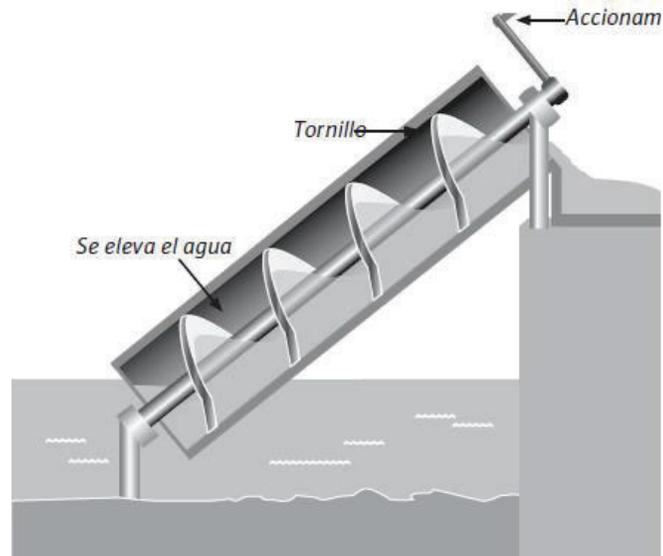
- Investigación documental sobre bombas de recirculación y bombas operando en paralelo.
- Selección de mecanismo para la simulación.
- Revisión literaria referida a la Ingeniería de Control.
- Revisión de manuales de Matlab. Descripción de herramientas para diseño y análisis de sistemas de control.
- Diseño de sistema de control automático para mecanismo donde actúa la bomba de recirculación y donde actúan las bombas en paralelo.
- Simulación del sistema de control diseñado mediante Matlab.
- Análisis de los resultados de la simulación mediante herramientas gráficas de Matlab.
- Conclusiones sobre la metodología general.

## 1.6 RESEÑA HISTÓRICA

### 1.6.1 RESEÑA HISTÓRICA SOBRE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

El origen de las bombas como mecanismo para apoyar procesos productivos se remonta a la época de los griegos. El matemático Ctesibius inventó alrededor del año 200 AC., el órgano de agua, una bomba de aire con válvulas en la parte inferior y que actualmente se conoce como bomba de émbolo. En la misma época, Arquímedes diseñó la bomba de tornillo, la cual aún se utiliza para el bombeo de líquidos y sólidos granulados.

La historia presenta registros que indican que la bomba de tornillo se utilizó principalmente para elevar agua (WILO, 2010), con inclinaciones entre los 37° y los 45°, consiguiendo alturas de elevación entre 2m y 6m, con caudales máximos de aproximadamente  $10 \frac{m^3}{h}$ . La bomba de tornillo se ilustra en la Figura 1.1. (RI, 2014; WILO, 2010)



**Figura 1.1** Representación de la bomba de tornillo de Arquímedes(WILO, 2010)

El suministro de agua fue la motivación principal para el desarrollo de las bombas. Sin embargo, más tarde el traslado de aguas residuales se convirtió en otra de sus funciones principales. Con el tiempo, todas las casas y construcciones estarán conectadas a la red de canalización pública, y en aquellos lugares donde no es posible tal conexión, por lo general se utilizan sistemas de elevación y desagüe por presión. En el traslado y tratamiento de las aguas residuales, actualmente se emplean bombas sumergibles, bombas de pozo, bombas de desagüe y bombas de recirculación. Las bombas han evolucionado durante 4000 años, alcanzando un nivel avanzado de tecnología que permite suplir las necesidades de la industria en cuanto a mover fluidos independientemente de su viscosidad.

En el siglo XX, las bombas que generalmente se utilizaban para la búsqueda y transporte de agua potable y tratamiento de agua residual, se adaptaron a las necesidades de la industria petrolera y, gracias a ella, experimentaron un vertiginoso desarrollo. En particular, permitieron la sustitución de la perforación por percusión, para emplear la perforación por rotación. En principio, se utilizaban bombas alternativas accionadas por vapor para subir agua a la superficie; sin embargo, éstas últimas fueron sustituidas por bombas centrífugas en el año de 1910 y bombas eléctricas sumergibles en el año de 1930. (TREVOR, 1987)

A la primera bomba de recirculación no se le conoció por ese nombre, sino por el de acelerador de circulación, utilizada para un sistema de calefacción con agua. Fue inventada por el ingeniero alemán Wilhelm Opländer en 1929, utilizando el motor eléctrico encapsulado creado antes por su colega alemán Gottlieb Bauknecht. La Figura 1.2 muestra una ilustración del diseño y construcción final de la primera bomba de recirculación. En un codo de la tubería por donde circula el agua caliente, se incorpora un rodete en forma de hélice, el cual se acciona mediante un eje obturado movilizado por la acción del motor eléctrico.(WILO, 2010)



**Figura 1.2** Diseño y Construcción de la primera bomba de recirculación(WILO, 2010)

Actualmente, las bombas se utilizan en la industria textil (para manejar colorantes, aguas, sulfuros de carbono, ácidos, sosa cáustica, sosa comercial, acetatos, decolorantes, soles, sales, peróxidos de hidrógeno, engomado y butano), en la industria siderúrgica (suministro de agua, remoción de escorias), en la refrigeración (para manejar los fluidos típicos como salmuera, agua, freones, amoníaco, etano, propano, entre otros), en el bombeo de gas desde grandes distancias, en el bombeo de aguas residuales, en la industria alimenticia (centrífugas, rotatorias o reciprocantes), en la industria química y farmacéutica.

## 1.6.2 RESEÑA HISTÓRICA DE SISTEMAS DE CONTROL

(KUO, 1996) afirma que los sistemas de control han sido protagonistas fundamentales en el desarrollo tecnológico de los años recientes. En la civilización moderna, prácticamente todos los aspectos de la vida diaria están de alguna manera relacionados o afectados por algún mecanismo dirigido por un sistema de control. Luego, la industria automotriz y de armamentos, la aeronáutica, los sistemas de transporte y de potencia, las telecomunicaciones, todos los sectores deben gran parte de su desarrollo a la automatización facilitada por los sistemas de control.

Según(OGATA K. , 1998), el regulador de velocidad centrífugo desarrollado por James Watt fue el primer trabajo de importancia, el primer invento por así decirlo, en materia de sistemas de control automático. Dicho aparato fue destinado para el control de la velocidad de una máquina de vapor en el siglo XVIII. Ya en el siglo siguiente, para el año de 1934, Hazen desarrolló los sistemas de control de posición, también llamados servomecanismos.

La evolución dio paso al método de la respuesta en frecuencia durante la década de los 40, permitiendo a los ingenieros “diseñar sistemas de control en lazo cerrado que cumplieran con los requerimientos de desempeño” (OGATA K. , 1998, pág. 2).

Al iniciar la década de los 50, apareció la propuesta de Evans sobre el método del lugar geométrico de las raíces, junto con el método de respuesta en frecuencia, se convertirían en el fundamento de la teoría clásica de sistemas de control. Para el estudio de sistemas de mayor complejidad, con múltiples entradas y salidas de sistemas lineales y no lineales que presentan requerimientos más estrictos, surge a partir de los años 60 la teoría de control moderna (DULHOSTE, 2012), basada en el método del espacio de estados.

La relación entre el control de procesos y los sistemas hidráulicos tiene orígenes antiguos. Alrededor del año 300 A.C., Ktesibio inventó el regulador del nivel del agua, basado en un flotador que mantiene constante dicho nivel en un depósito intermedio que a su vez alimenta un depósito final. Para esa época surge también el regulador del nivel de aceite de una lámpara de Philon. Con características

semejantes, para la edad media se desarrollan diferentes dispositivos para la regulación del nivel de líquido, de su presión o de su caudal.

En la época actual, casi todos los mecanismos técnicos necesitan de un buen sistema de control para poder operar con eficacia y eficiencia. En toda instalación donde actúa una bomba, también es fundamental contar con un dispositivo de regulación. Por ejemplo, en un sistema de calefacción, los dispositivos básicos para la regulación son las válvulas termostáticas que, junto con el resto del sistema (calderas, mezcladoras y bombas), tienen la función de mantener constante la temperatura de una habitación. Las bombas hoy en día, disponen de reguladores mecanismos, eléctricos o electrónicos muy sofisticados, sobre todo en instalaciones de alta complejidad con rigurosos protocolos de seguridad como lo son las centrales hidráulicas de generación eléctrica.

## 1.7 MARCO CONCEPTUAL

En las investigaciones que se detallan posteriormente se calcularon teóricamente los parámetros de un sistema donde intervienen bombas centrífugas, luego se compararon con resultados experimentales obtenidos en laboratorios de ingeniería hidráulica. Además, se realizaron ensayos físicos y reales de los sistemas estudiados utilizando la infraestructura y equipos disponibles en laboratorios.

En el presente proyecto la diferencia radica fundamentalmente, en que en este caso no se realizan ensayos reales de los sistemas estudiados. Del mismo modo, que en las investigaciones consultadas. Por esta razón, se realizaron cálculos teóricos de los parámetros que intervienen en el sistema y se desarrolló una simulación utilizando herramientas informáticas avanzadas, donde se derivan resultados que serán confrontados con los obtenidos mediante el análisis teórico.

- Erazo (2012) *“Diseño y construcción de un módulo de laboratorio con variador de frecuencia para el control de un sistema de bombeo y determinación del ahorro energético”*. Diseñó y construyó un módulo para el control de un sistema de bombeo aprovechando las facultades de los variadores de frecuencia para reducir los costos de estos sistemas en el área industrial en la ciudad de Riobamba.

- Suin y Arroyo (2011) "*Ensamble de un variador de frecuencia para el control y regulación de caudal de una bomba dosificadora en el módulo de automatización industrial con pantalla táctil*". Efectuaron un estudio para el control y regulación del caudal de una bomba dosificadora en un área industrial de Riobamba, para lo cual utilizaron equipos electrónicos de alta sofisticación.
- Ramírez (2012) "*Estudio de Bombas Centrífugas y su Factibilidad de Aplicación en la Facultad de Ingeniería Mecánica*". Realizó un estudio sobre las bombas centrífugas y su factibilidad de aplicación en la Facultad de Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.
- Rosero "*Desarrollo de un algoritmo y programa en Matlab para sistematizar y automatizar un modelo digital hidrodinámico en estado estable de un oleoducto para transporte de crudo liviano*". Esquemató de manera secuencial los cálculos, pasos y consideraciones que se deben realizar para diseñar hidrodinámicamente un oleoducto y automatizar todo el procedimiento mediante Matlab.
- Yunapanta(2011) "*Modelación y simulación de un sistema centralizado de bombeo hidráulico tipo jet de un campo petrolero*". Realizó la modelación y simulación de un sistema de fluido motriz centralizado de bombeo hidráulico tipo jet, utilizando el software Matlab. Utilizó el modelo Newton-Raphson, procedimiento iterativo puramente matemático que permite la resolución de una Red de Distribución.
- Silva (2014) "*Análisis de Transitorios en Estaciones de Bombeo de un Sistema Poliducto*". Realiza un estudio de los transitorios que pueden producirse en las estaciones de bombeo de un sistema poliducto considerando diferentes perturbaciones generadas por las revoluciones de las bombas. Realiza simulaciones en Matlab, lo cual permite implementar los algoritmos obtenidos del desarrollo de las ecuaciones que representan cada uno de los transitorios.

## CAPÍTULO 2

### SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE SISTEMAS DE CONTROL

#### 2.1 MARCO TEÓRICO

Tanto la hidráulica como la mecánica de fluidos, estudian en sí el comportamiento de fluidos en estado de reposo o en movimiento. Para entender el fenómeno hidráulico que se produce en los equipos como: cilindros, bombas, tensionadores, cortadoras, prensas, manómetros, etc. Se detalla los principios básicos de la hidráulica.(GILES, 1994)

- **Presión:** es la fuerza ejercida  $dF$ , expresada en newtons (N) sobre una superficie  $dA$ , expresada en metros cuadrados ( $m^2$ ), visto en las ecuaciones 1.1 y 1.2.

$$p \text{ (N/m}^2\text{)} = \frac{dF \text{ (N)}}{dA \text{ (m}^2\text{)}} \quad (1.1)$$

Cuando la fuerza es uniforme sobre una superficie  $A$  se tiene que:

$$p \left( \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ ó Pascales Pa} \right) = \frac{F}{A} \text{ (Pa)} \quad (1.2)$$

La presión hidráulica de un fluido actúa sobre una superficie plana y transmite con igual intensidad en todas las direcciones, es decir, que el valor de la presión es la misma en cualquier punto.

- **Fluido:** se dividen en líquidos y gases. La principal característica es fluir y ser adaptable a la forma del recipiente. Todo fluido ofrece poca resistencia a los cambios de forma.
- **Densidad:** se define como la masa por unidad de volumen.

$$\text{densidad } \rho = \frac{w \text{ (masa)}}{g \text{ (volumen)}} \quad (1.3)$$

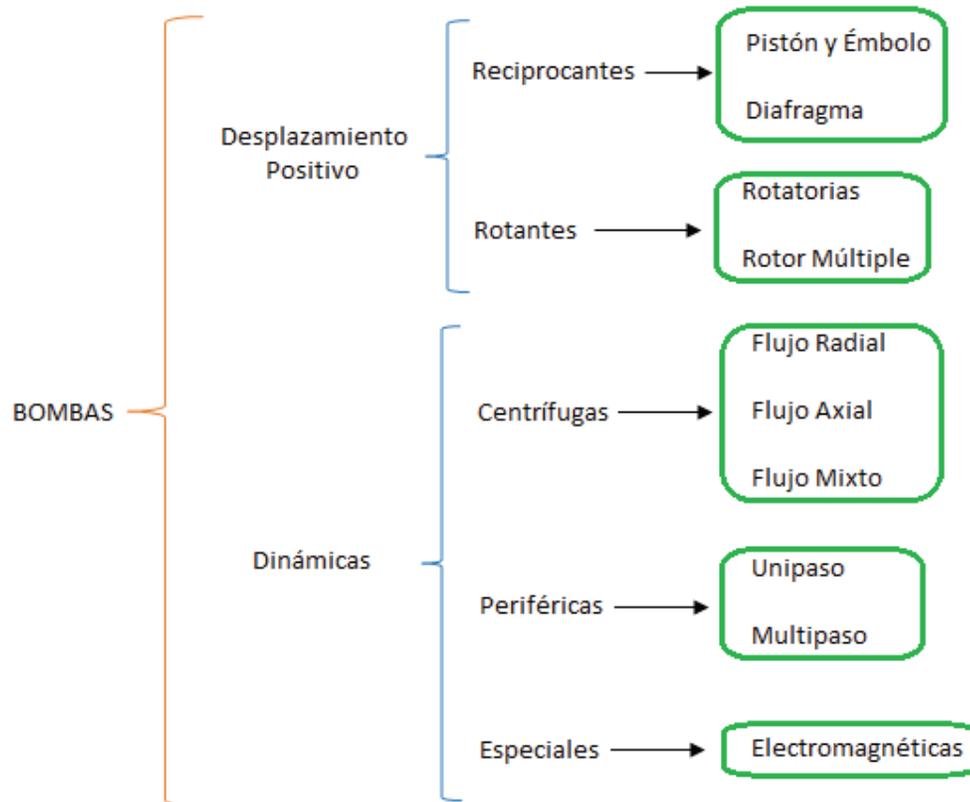
- **Calor específico:** determina la cantidad de calor que debe suministrar a la unidad de masa de la sustancia.
- **Velocidad de un Fluido:** cambio de posición o desplazamiento de un fluido con respecto al tiempo.
- **Presión de Vapor:** presión total que se genera en la superficie de un fluido donde inicia su punto de ebullición y su estado gaseoso (Vapor) a determinada temperatura. Se genera cuando la temperatura de un fluido aumenta a presión constante o viceversa.
- **Temperatura:** magnitud que representa el estado físico de un fluido o cantidad de energía interna que poseen las partículas del mismo y puede ser cuantificado en grados Celsius, Kelvin y Fahrenheit.
- **Masa:** medida de inercia, que se puede definir como una magnitud escalar que cuantifica la sustancia. Puede ser representada en Kg en el sistema internacional o en Lbm en el sistema inglés.
- **Volumen de un líquido:** unidad de medida que cuantifica la cantidad de un fluido que es alojado en un recipiente.
- **Flujo másico:** magnitud que determina la masa de un fluido que varía con respecto al tiempo.
- **Flujo Volumétrico:** Magnitud que determina la cantidad de volumen de un fluido que varía con respecto al tiempo.
- **Bomba:** Máquina que transforma energía eléctrica en energía mecánica o de movimiento.

(VIEJO & ÁLVAREZ, 2004) Señalan que “un equipo de bombeo es un transformador de energía. Recibe energía mecánica, que puede proceder de un motor eléctrico, térmico, etc., y la convierte en energía que un fluido adquiere en forma de presión, de posición o de velocidad”. Cambiar la posición de un fluido es una de las funciones básicas de las bombas. Así, por ejemplo, se tiene bombas de pozo profundo, que transmiten energía para que el agua salga a la superficie.

Por otra parte, en un oleoducto se necesita una bomba que transmita presión para vencer pérdidas de fricción en la conducción de fluidos a través de largas tuberías y cotas de altura. Otras aplicaciones necesitan sólo que las bombas aumenten la velocidad del líquido. La velocidad del líquido se expresa en metros sobre

segundo (m/s). Los sistemas públicos de suministro de agua potable son un buen ejemplo para ilustrar la necesidad de adaptar la velocidad de circulación del agua por las tuberías a las fluctuaciones de la demanda.(CZEKAJ, 1988)

Una breve clasificación de las bombas, que permite apreciar la gran variedad de las mismas, se visualiza en la Figura 2.1.(VIEJO & ÁLVAREZ, 2004)



**Figura 2.1** Clasificación de las Bombas (VIEJO & ÁLVAREZ, 2004)

Al seleccionarse una bomba para una aplicación específica, se deben tomar en cuenta los siguientes factores (MOTT, 2006):

- Naturaleza del líquido por bombear.
- Capacidad requerida (flujo volumétrico).
- Condiciones del lado de succión (entrada) de la bomba.
- Condiciones del lado de descarga (salida) de la bomba.
- Carga total sobre la bomba.

- Tipo de sistema donde la bomba impulsa el fluido.
- Tipo de fuente de potencia (motor eléctrico, motor diésel, turbina de vapor y otros).
- Limitaciones de espacio, peso y posición.
- Condiciones ambientales.
- Costo de adquisición e instalación de la bomba.
- Costo de operación de la bomba.
- Códigos y estándares gubernamentales.

Una vez seleccionada la bomba, es necesario especificar las características técnicas de la bomba:

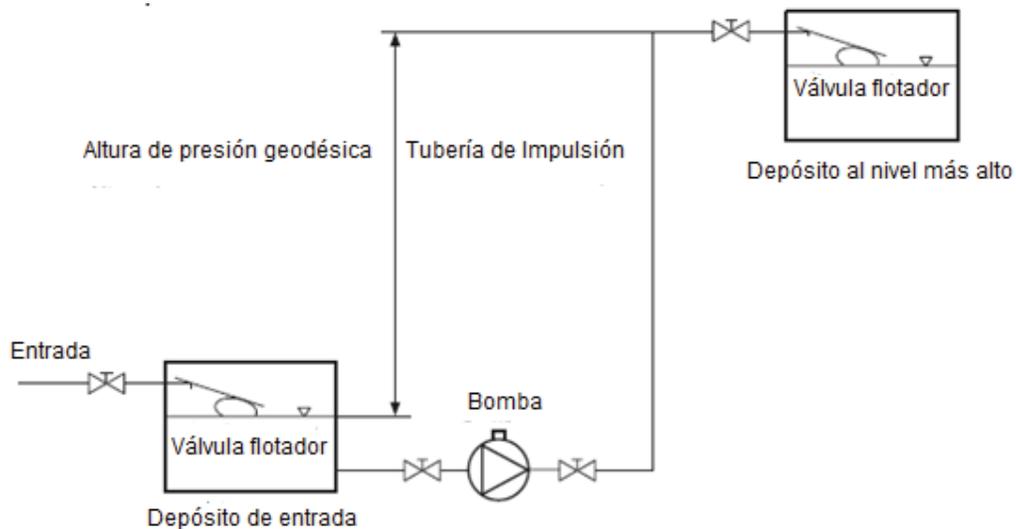
- Tipo y tamaño de la bomba.
- Tamaño de la conexión de succión y tipo (bridada, atornillada y otros).
- Tamaño y tipo de la conexión de descarga.
- Velocidad de operación.
- Especificaciones para el impulsor.
- Tipo de acoplamientos, marca y número de modelo.
- Detalles de montaje.
- Materiales y accesorios especiales que se requieren, si hubiera alguno.
- Diseño y materiales del sello del eje.

Por lo general, los catálogos de bombas proporcionan toda la información necesaria para seleccionar adecuadamente el equipo según la aplicación, además de cumplir con las especificaciones de diseño de los sistemas que regulan su funcionamiento, como es el caso de los sistemas automáticos.

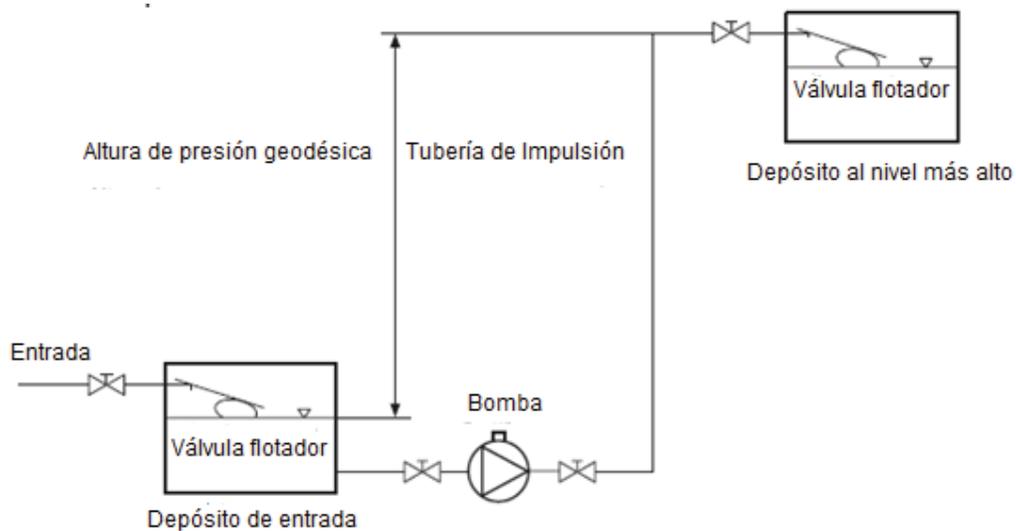
## **2.2 BOMBAS DE RECIRCULACIÓN**

La función primordial de los sistemas de recirculación consiste en el transporte de energía entre los diferentes elementos de la instalación. Las bombas que se utilizan en la recirculación tienen la tarea de recuperar pérdidas hidráulicas. Un tipo de bomba utilizada en los sistemas de recirculación es la bomba centrífuga y

son empleadas en sistemas abiertos; como aplicación se puede utilizar para elevar el nivel del agua o transportar líquidos de un recipiente de menor altura a uno de mayor altura (Figura 2.2), o en circuitos cerrados como: los sistemas de calefacción, aire acondicionado, energía solar y agua caliente sanitaria (Figura 2.3).



**Figura 2.2** Bomba instalada para elevar agua en un Sistema Abierto (WILO, 2010)

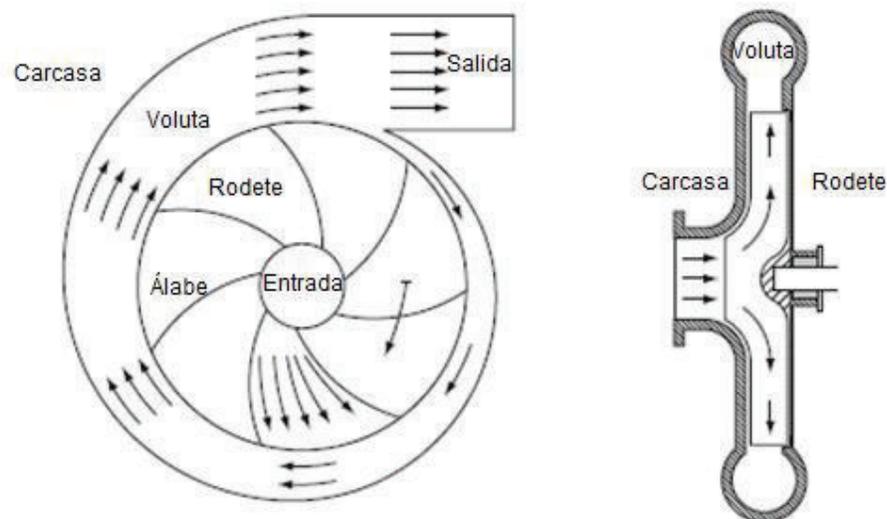


**Figura 2.3** Bomba instalada para la circulación de calefacción en un Sistema Cerrado (WILO, 2010)

Por el tipo de construcción y transformación de la energía eléctrica a mecánica, se tiene bombas centrífugas. El principio de operación consiste en succionar agua por la boca de aspiración de forma axial y luego se desvía por las paletas del rodete radialmente. Las fuerzas centrífugas originadas en las moléculas del agua, producen a su vez un aumento de la presión y de la velocidad. Así, la transformación de la energía se manifiesta en aumento de la presión. (IDAE, 2012)

Antes de poner a funcionar una bomba centrífuga es preciso ejecutar el “cebado de la bomba”, proceso que consiste en llenar con agua el tubo de aspiración y la caja del rodete para expulsar el aire, también puede lograrse la expulsión del aire mediante aparatos diversos. (IDAE, 2012)

Las principales ventajas de este tipo de bombas son: alto rendimiento, bajo costo, sencillez de instalación y alcance elevado de velocidad. (WILO, 2010) Así mismo, las principales desventajas radican en el alcance limitado de altura (máximo 10 metros del depósito a la Bomba) y la necesidad de ser cebada. Por estas dos limitaciones, es conveniente instalar la bomba lo más cerca posible al depósito, protegiéndola de manera apropiada contra los períodos de inundación para evitar que quede sumergida o que el agua cubra el motor eléctrico. (OLSON & HALSEN, 2003)

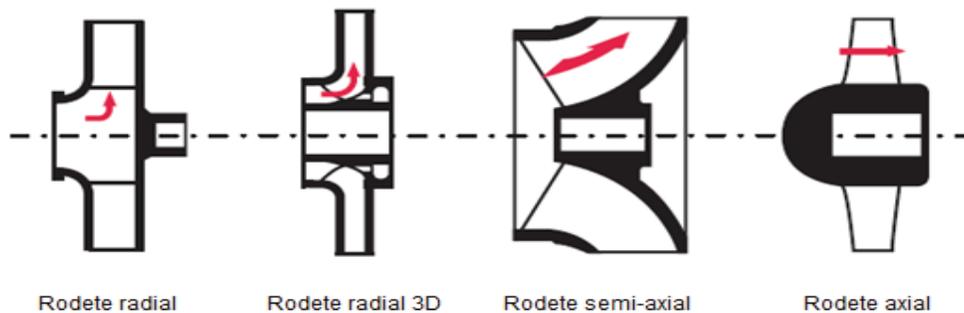


**Figura 2.4** Elementos principales de las bombas centrífugas (IDAE, 2012)

Las bombas centrífugas tienen tres partes principales, las cuáles son: la parte móvil o rodete, la parte fija o carcasa y el motor. Los componentes físicos de la bomba centrífuga se ilustran en la Figura 2.4. A continuación una descripción más detallada de las partes principales de las bombas centrífugas.(IDAE, 2012)

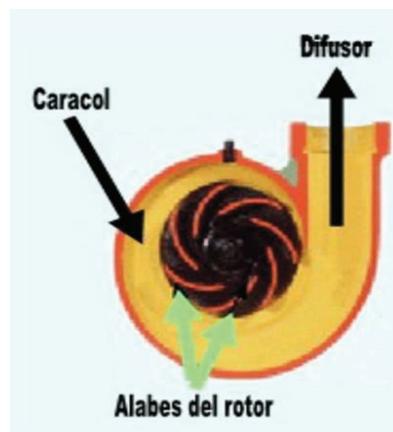
- **Rodete**

Es el elemento principal de las turbo-máquinas. Están diseñadas para que el flujo circule sin choque por los canales en el punto nominal de su funcionamiento; formado por los álabes, optimizando al máximo el momento cinético del flujo de salida. Las bombas centrífugas tienen por lo general de 5 a 9 álabes; mientras más álabes, más canales y buena conducción de flujo. Actualmente, la mayoría de los rodetes de las bombas son del tipo 3D, los cuáles combinan las ventajas de un rodete axial con las de un rodete radial. Los tipos de rodetes se ilustran en la Figura 2.5.(WILO, 2010)



**Figura 2.5** Tipos de rodetes (WILO, 2010)

- **Difusor**

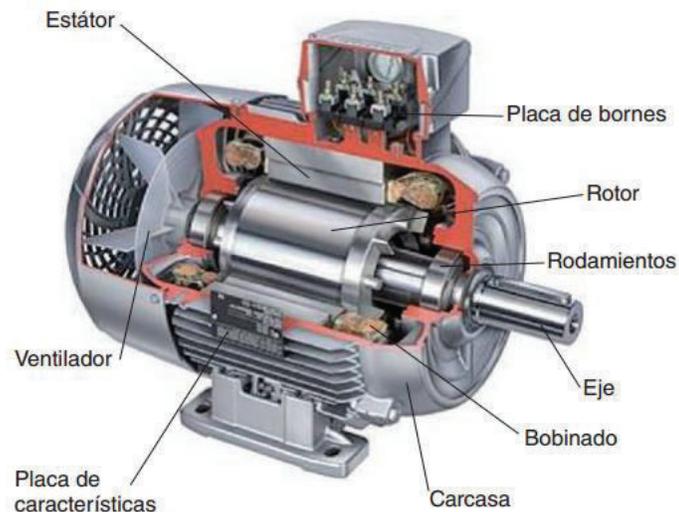


**Figura 2.6** Bomba Centrífuga con difusor (UNET, 2005)

Es un canal de sección creciente que rodea al rodete, recogiendo el fluido que sale del mismo. Reduce la energía cinética del flujo, transformando esta energía a presión estática. Dependiendo de la forma y disposición del difusor, las bombas centrífugas pueden ser de voluta (carcasa en forma de caracol, como en la Figura 2.4) o de turbina (el área del flujo se ensancha a medida que se acerca a la salida) visto en la Figura 2.6.

- **Motor Eléctrico**

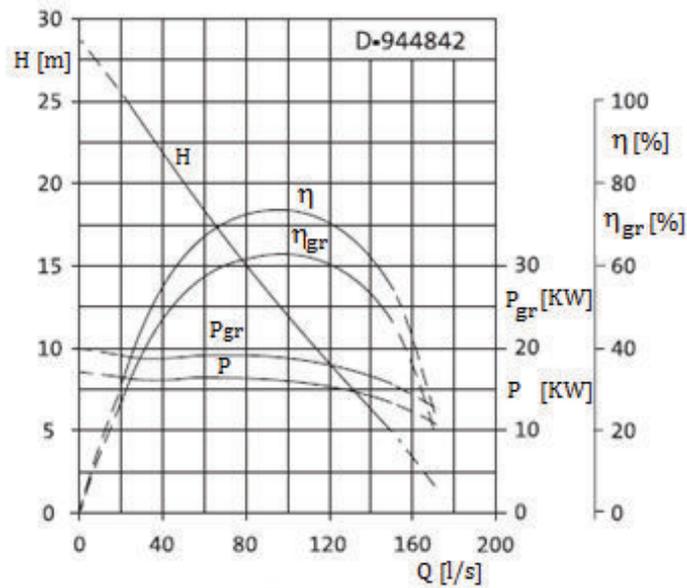
Las bombas rotodinámicas empleadas en los circuitos cerrados, por lo general usan un motor eléctrico. El motor comunica su potencia al rodete, el cual, provisto de álabes que forman canales, aumentan la velocidad del líquido en dirección tangencial. Los motores eléctricos son máquinas que transforman la energía eléctrica de una fuente externa, en energía mecánica o de flecha. Están constituidos generalmente por un circuito magnético (estator) y dos circuitos eléctricos (rotor) Figura 2.7.



**Figura 2.7** Sección de motor Eléctrico (ASSETS, 2010)

## 2.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

Las características de las bombas centrífugas suelen representarse mediante gráficas denominadas curva característica de la bomba. Según el tipo de bomba, los datos utilizados para elaborar dichas curvas suelen provenir de pruebas realizadas por el fabricante de dicha bomba. Como ejemplo, la Figura 2.8 representa la curva característica de una bomba sumergible.



**Figura 2.8** Punto de trabajo de la bomba (D). Curva característica de la tubería de impulsión (GRUNDFOS, 2013)

Dónde:

$Q$ : Volumen del caudal;

$H$ : Altura total de la bomba;

$P_{gr}$ : Potencia de entrada del motor;

$\eta_{gr}$ : Rendimiento total;

$P$ : Potencia de entrada de la bomba;

$\eta$ : Rendimiento de la bomba.

Se muestra en la Figura 2.8, la altura  $H$  de la bomba en función del caudal  $Q$ . Las secciones discontinuas de la curva representan la zona donde es prohibida la operación de la bomba por distintos motivos de seguridad (cavitación, vibraciones o sobrecarga del motor). La Figura anterior también muestra como el rendimiento  $\eta$  de la bomba depende tanto del volumen del caudal  $Q$  como de la altura  $H$ . Este rendimiento puede indicarse como un ratio o porcentaje. El rendimiento  $\eta_{gr, total}$  está relacionado con las pérdidas del motor.

### 2.2.2 SISTEMAS DE BOMBAS EN PARALELO

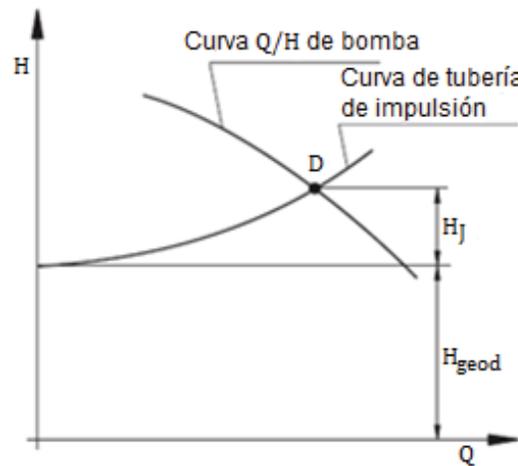
La operación de dos o más bombas en paralelo representa una solución para aquellos sistemas que necesitan flujos volumétricos o aplicaciones industriales y de servicios públicos que demandan cantidades variables de fluidos, como por ejemplo sistemas de riego, redes de distribución de agua potable, entre otras. Dichas exigencias no pueden ser satisfechas por la operación de una sola bomba sin correr el riesgo de que dicha bomba opere muy lejos de su eficiencia, por lo que la operación de las bombas en paralelo permite que cada una de ellas actúe en su punto de operación, extrayendo el fluido de la misma fuente de entrada y enviándolo a un colector común para hacerlo llegar a todo el sistema. (MOTT, 2006)

Las bombas en paralelo tienen cierta diferencia en su funcionamiento con respecto a las bombas en serie. “Para bombas en serie, el rendimiento requerido se obtiene agregando las cargas a la misma capacidad. Si las bombas operan en paralelo, se agregan las capacidades a la misma carga” (VIEJO & ÁLVAREZ, 2004, pág. 174).

Para explicar el funcionamiento de las bombas en paralelo, se utilizará el caso de bombas sumergibles: por ejemplo, donde el concepto de tubería de impulsión se refiere a aquella utilizada para conducir el agua desde puntos de menor cota, hasta otros puntos de cota mayor (HIDRASOFTWARE, 2012). Luego, se hace necesario en primer lugar introducir el concepto de altura geodésica  $H_{geod}$  y la pérdida en la tubería  $H_f$ . La altura  $H$  de la tubería de impulsión se obtiene

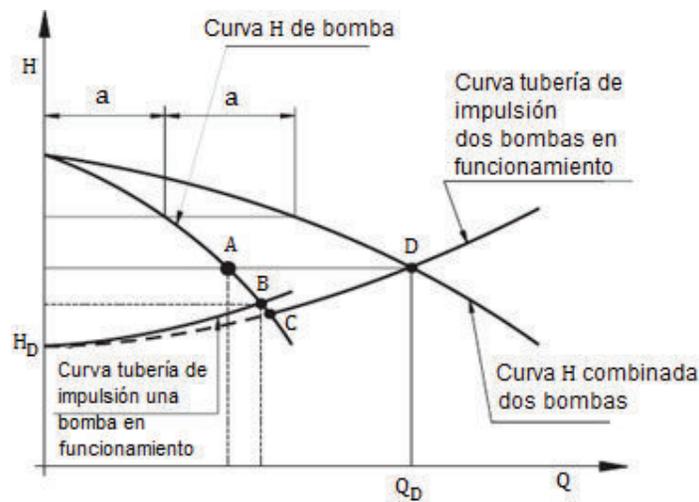
sumando  $H_{\text{geod}}$  y  $H_j$ , tal como muestra el Figura 2.9, donde se representa la curva del caudal  $Q$  respecto a la altura  $H$  de la bomba y la intersección con la curva característica de la tubería de impulsión, lo que permite obtener el punto D de trabajo de la bomba:

En el punto D, la altura de la bomba es la misma que la altura de la tubería. Se pueden presentar varios casos cuando las bombas funcionan en paralelo.



**Figura 2.9** Curva característica del Sistema de bombas en paralelo (GRUNDFOS, 2013)

- **Bombas idénticas**

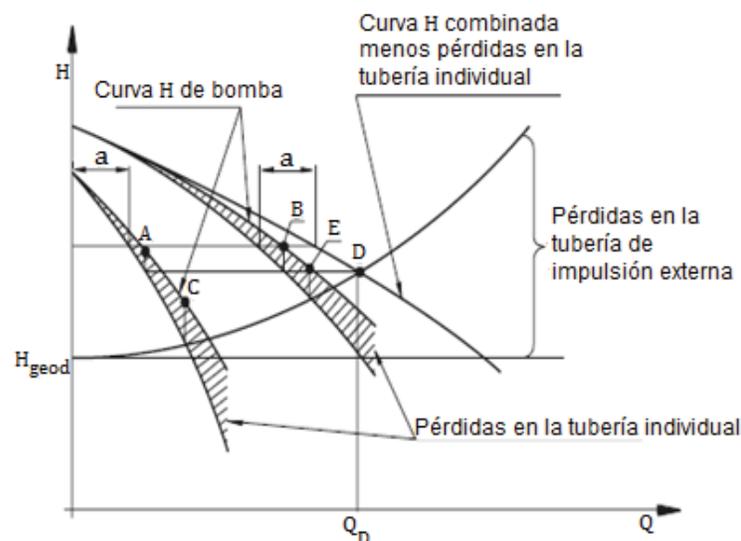


**Figura 2.10** Curva característica operando con bombas idénticas en paralelo (GRUNDFOS, 2013)

Cuando dos o más bombas están funcionando en paralelo, el caudal combinado de ambas fluye a la misma tubería de impulsión. La forma de la curva característica de la tubería depende ligeramente del número de bombas funcionando, debido a que cada bomba posee su propia tubería de descarga. Suponiendo el caso ideal en que ambas bombas son idénticas, al igual que las tuberías de separación que luego se unen mediante un ramal o colector a la tubería de impulsión, la curva característica de dicha tubería se visualiza en la Figura 2.10.

El punto B muestra el punto de operación de ambas bombas funcionando a solas, mientras el punto D es el punto de operación de ambas funcionando combinadamente, mostrando claramente el desempeño del sistema de bombeo. La resistencia en la tubería aumenta con el caudal, por lo que el rendimiento  $Q_d$  combinado de las dos bombas será siempre menor que el doble del rendimiento de una sola bomba. En consecuencia, en el punto C es considerado el verdadero punto de operación de una de las bombas funcionando en solitario. El punto de trabajo de ambas bombas en cualquier caudal  $Q$  también puede obtenerse marcando la suma de dos curvas de altura a altura constante, como lo resaltan los segmentos (a) de la Figura 2.9.

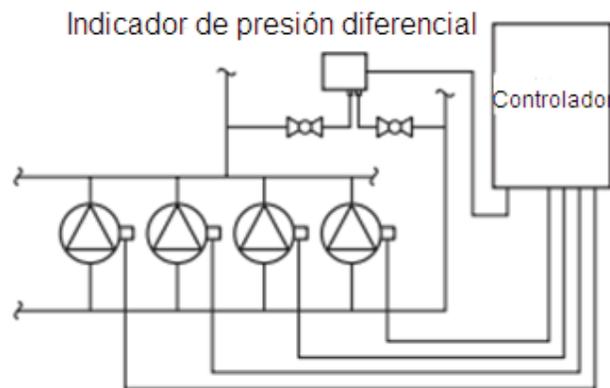
- **Bombas diferentes**



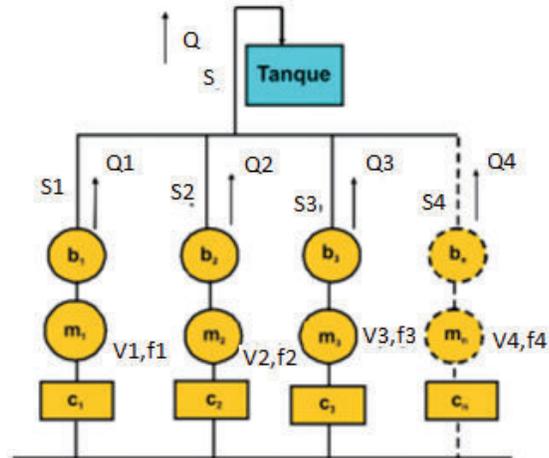
**Figura 2.11** Curva característica operando con bombas diferentes en paralelo  
(GRUNDFOS, 2013)

Para ilustrar el punto de trabajo de dos bombas diferentes funcionando en paralelo, es necesario además suponer que las tuberías que las separan hasta llegar al colector común, también tengan características diferentes. En la Figura 2.11, se puede observar la curva característica de la tubería de impulsión. Las pérdidas en cada tubería, considerando cada bomba por separado, se reducen de sus respectivas curvas de altura. Así se obtiene la curva Hde rendimiento combinada, obteniéndose luego el punto D de operación al interceptarse dicha curva con la curva de la tubería de impulsión. A y B, son puntos de trabajo individuales a altura constante, mientras C y E son puntos de trabajo por separado.

En una instalación para bombas en paralelo se la puede regular mediante la Figura 2.12. Esta conlleva un dispositivo electrónico integrado con el objeto de regular la velocidad de la bomba o bombas, accionada por el indicador de presión diferencial. Esto ayudará a mantener un caudal a un nivel constante.(WILO, 2010)



**Figura 2.12** Instalación de bombas en paralelo (WILO, 2010)

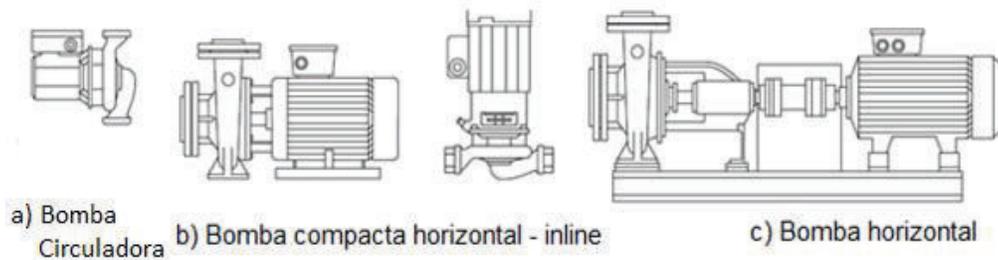


**Figura 2.13** Operación de bombas en paralelo con variadores de velocidad  
(ZERQUERA & SÁNCHEZ, 2010)

Para grandes instalaciones, este tipo de conexión ayuda en un mayor tiempo de vida útil en comparación al uso de una bomba centrífuga. Ya que permite realizar sincronías de uso entre bombas para mantenimientos y/o reemplazos en caso de daños sobre cualquier bomba. En la práctica por lo general se encuentran sistemas de bombeo que utilizan bombas centrífugas con variadores de velocidad operando en paralelo, visto en la Figura 2.13.(ZERQUERA & SÁNCHEZ, 2010)

### 2.2.3 APLICACIONES DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

Las diferentes aplicaciones necesarias para las bombas centrífugas, han conducido al desarrollo de diferentes tipos de bombas, las cuáles se visualizan en la Figura 2.14 y se enlistan a continuación:(IDAE, 2012)

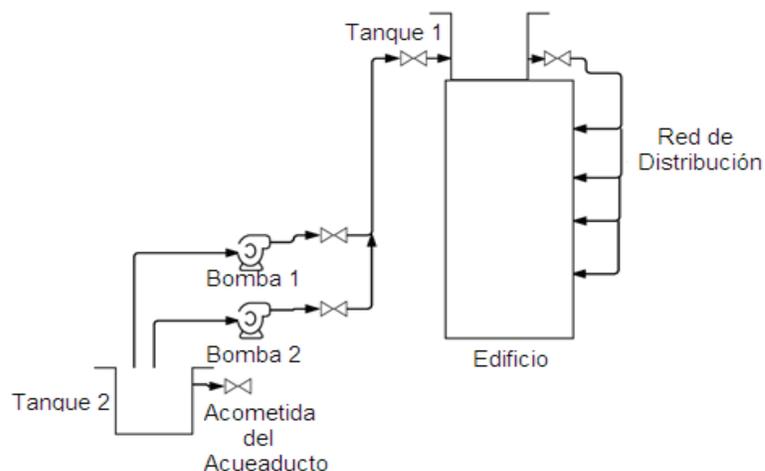


**Figura 2.14** Elementos principales de las bombas centrífugas (IDAE, 2012)

- Bombas circuladoras: bombas centrífugas sencillas, muy silenciosas, diseñadas para recirculación de agua fría o caliente en sistemas de climatización o agua sanitaria. Se trata de bombas de rotor húmedo donde el mismo líquido bombeado refrigera el motor. Son de baja potencia (1 a 3 KW), bajas presiones (inferiores a 15 m.c.a), se deben montar siempre con el eje en posición horizontal, son resistentes y de alto rendimiento.
- Bombas compactas: conjunto con eje único motor-bomba, utilizadas en bombeo de agua limpia, equipos de presión, aire acondicionado, etc.
- Bombas de bancada u horizontales: de potencia media-alta, empleadas en industrias de riego, grandes instalaciones de calefacción, equipos contra incendios, etc.

La aplicación de bombas en paralelo puede ser utilizados para un sistema de bombeo tanque a tanque, visto en la Figura 2.15. El sistema consiste en: (WEKKER, 2004)

- Un tanque 1 ubicado a cierta altura en la azotea del edificio.
- Una tubería vertical de la cual se distribuirá agua para cada piso, el suministro de agua se dará por gravedad y evitando sobrepresiones en las tuberías.
- Un tanque 2 ubicado en la parte inferior o subterránea del edificio, donde se almacenará el agua que llega del abastecimiento público.
- Dos bombas en paralelo que impulsarán el agua al tanque 1.

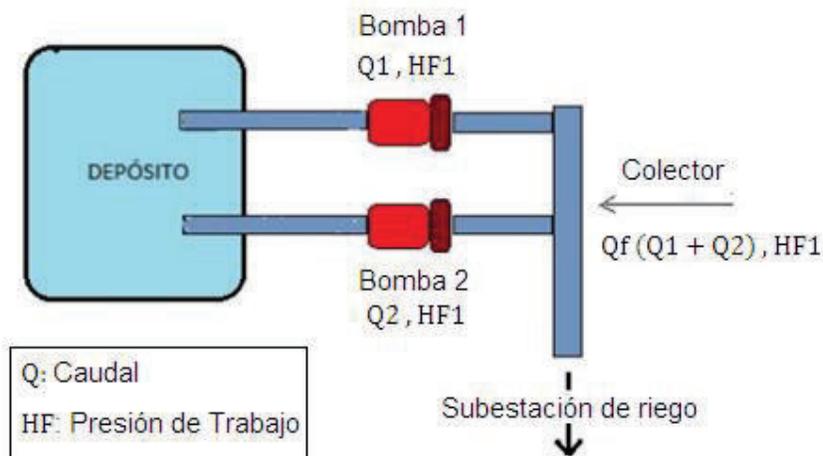


**Figura 2.15** Sistema de Bombeo de tanque a tanque (WEKKER, 2004)

Otro ejemplo, es el sistema de riego localizado, el cual consta del cabezal de riego situado al principio de instalación (Figura 2.16). Estos elementos que conforma el cabezal de riego por lo general poseen de la captación de agua (pozos, red pública, depósitos o balsas), impulsión del agua (bombeo), limpieza del agua (filtros), dosificación e inyección de fertilizantes (inyectores), dispositivos de medición y control (manómetros, sensores, válvulas, etc). Estos dispositivos variarán en base al grado de automatización del sistema.(FERNANDES & GONZÁLEZ, 2014)



**Figura 2.16** Cabezal de riego (FERNANDES & GONZÁLEZ, 2014)



**Figura 2.17** Bombas iguales conectadas en paralelo (FERNANDES & GONZÁLEZ, 2014)

Para la colocación de bombas en paralelo (Figura 2.17) es aconsejable que se disponga de bombas iguales. En caso de avería de una bomba, puede funcionar la otra mientras la averiada es reparada.

## 2.3 ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LOS SISTEMAS DE FLUJO

Los sistemas de flujo son diseñados para el desplazamiento de fluidos, líquidos o gases, a través de conductos rectos (generalmente cilíndricos), más o menos largos y complejos; el sistema se enlaza por uniones que pueden ser curvaturas de la misma tubería, codos y válvulas. En el caso del líquido, el mismo fluye espontáneamente solo, si la energía total en el sistema disminuye en la dirección del flujo (MARTÍN, SALCEDO, & FONT, 2011).

Caso contrario, es necesario comunicar al fluido energía exterior por medio de las bombas. Dicha energía se invierte en el aumento de la velocidad, la altura o la presión del fluido. La energía que se debe transmitir al fluido, a su vez, depende de su caudal, de la altura a la que debe elevarse, de la presión que se requiere, las longitudes y diámetros de los tramos rectos, de los accidentes en las conexiones, de su viscosidad y su densidad. Ese conjunto de factores son los que se comienzan a tomar en cuenta con la ecuación 1.4, conocida como la ecuación de Bernoulli (MOTT, 2006), considerando un flujo estacionario e ideal.

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (1.4)$$

Donde la energía mecánica del flujo en un punto 1, se presenta de tres modos:

- $\frac{P_1}{\rho g}$ : Energía de presión en el punto 1, también denominada carga de presión
- $\rho$ : Densidad, del agua  $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$
- $g$ : Gravedad,  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- $Z_1$ : Energía potencial debido a la altura 1, carga de elevación

- $\frac{V_1^2}{2g}$ : Energía cinética en el punto 1, o carga de velocidad.

La energía mecánica específica  $W_{esp}$  del flujo en un punto cualquiera  $p$ , la misma se puede calcular mediante la ecuación anterior generalizada. (IDAE, 2012)

$$W_{esp} = \frac{P_p}{\rho} + gZ_p + \frac{V_p^2}{2} \quad (1.5)$$

Dónde  $W_{esp}$ : energía mecánica específica en  $m^2/s^2$ . Al dividir  $W_{esp}$  entre la gravedad  $g$ , se deriva otro importante concepto denominado “altura del punto  $p$ ”  $H_p$ .

$$H_p = \frac{W_{esp}}{g} = \frac{P_p}{\rho g} + Z_p + \frac{V_p^2}{2g} \quad (1.6)$$

Dónde:  $H_p$ : Altura del punto  $p$  en m c.a., energía que posee el fluido por unidad de peso. A cada término de la ecuación 1.6, como se señaló antes, se le denomina carga en el argot de la mecánica de fluidos, las cuáles son pérdidas y ganancias de un sistema hidráulico y se cuantifican en términos de energía por unidad de peso del fluido. La letra  $H$  se usa para denominar una carga, por tanto  $H_p$  es la carga en el punto  $p$ .

La magnitud de la pérdida de energía debido a la fricción que se produce entre el fluido y la superficie de las tuberías, así como entre el fluido y los accesorios (conexiones, uniones, codos, etc.), es un tipo de carga comúnmente denominada  $H_L$  y se puede calcular mediante la ecuación 1.7.

$$H_L = K \left( \frac{V^2}{2g} \right) \quad (1.7)$$

Dónde:

- $H_L$ : Pérdida de energía por fricción.
- $K$ : Coeficiente de resistencia. Depende de la naturaleza del fluido, tipo de válvula, etc.

$H_L$  es una carga que puede expresarse como compuesta por dos tipos de pérdidas, las pérdidas debidas a las tuberías  $H_{L,tub}$  y las pérdidas ocasionadas por los accesorios  $H_{L,acc}$ .

$$H_L = H_{L,tub} + H_{L,acc} \quad (1.8)$$

La pérdida  $H_{L,acc}$  puede ser calculada mediante la ecuación 4, mientras la pérdida  $H_{L,tub}$  se calcula mediante la ecuación 1.9.

$$H_{L,tub} = f \left( \frac{V^2}{2g} \right) \left( \frac{L}{D} \right) \quad (1.9)$$

Dónde:

- $f$ : Factor de fricción de Darcy, calculado mediante experimentación.
- $\frac{L}{D}$ : Longitud entre diámetro de la tubería

Una adaptación de la ecuación de Bernoulli al hecho real de que en un sistema de flujo se producen ganancias y pérdidas, conduce a un replanteo de la ecuación 1.4.

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + H_a = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + H_L \quad (1.10)$$

Dónde  $H_a$ , representa la energía que se agrega al fluido mediante un dispositivo mecánico: bomba, prensas, etc. La expresión  $H_a$  es fundamental en el estudio de los sistemas de flujo, también es conocida como carga total sobre la bomba. Muchos fabricantes de bombas también la denominan carga dinámica total o TDH (Total Dynamic Head), que no es otra cosa que la altura a la cual se va a bombear el fluido, considerando las pérdidas de fricción del fluido en las tuberías. Luego, despejando  $H_a$  de la ecuación 1.9, se tiene: (MOTT, 2006)

$$H_a = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + Z_2 - Z_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + H_L \quad (1.11)$$

La ecuación 1.11, resume el total de tareas que debe realizar una bomba en un sistema dado, las cuáles se describen a continuación:

- Debe elevar la presión del fluido desde la que posee en  $P_1$ , hasta la que tendrá en  $P_2$ .

- Debe subir el fluido desde el nivel  $Z_1$  hasta el nivel  $Z_2$ .
- Tiene que incrementar la velocidad del fluido desde  $V_1$  hasta  $V_2$ .
- Debe compensar las pérdidas debidas a  $H_L$ .

A partir de la carga total sobre la bomba, se deriva la siguiente relación que involucra otro de los factores esenciales en el funcionamiento de sistemas de fluidos: el caudal  $Q$  junto con la carga total, determinan la energía que una bomba transfiere a un fluido, en otras palabras, la potencia  $P_A$  es igual a:

$$P_A = H_a \rho g Q \quad (1.12)$$

A partir de la ecuación 1.12, se obtendrán las siguientes relaciones para rendimiento hidráulico  $\eta_H$ , rendimiento volumétrico  $\eta_V$  y rendimiento orgánico  $\eta_O$ , que junto con la ecuación 1.11 describen el comportamiento dinámico de los sistemas de fluidos impulsados por bombas. Si se tiene en cuenta el rendimiento del motor eléctrico, se obtendrá la relación entre la potencia eléctrica consumida  $P_E$  y la potencia del eje  $P_{eje}$ . Por sustitución algebraica, se designa al gasto másico que impulsa la bomba como  $\dot{M} = \rho Q$ , el producto de la densidad del fluido por el caudal. Luego, se designa la altura manométrica como  $H_M$ , donde:

$$H_M = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + Z_2 - Z_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} \quad (1.13)$$

Donde:

$$H_a = H_M + H_L \quad (1.14)$$

$$P_A = (H_M + H_L)g\dot{M} \quad (1.15)$$

El rendimiento hidráulico se define como el cociente entre la potencia manométrica realmente comunicada al fluido y la suma de ésta con las pérdidas internas. (IDAE, 2012)

$$\eta_H = \frac{(H_M)g\dot{M}}{(H_M + H_L)g\dot{M}} = \frac{H_M}{H_M + H_L} \quad (1.16)$$

El rendimiento volumétrico (ecuación 1.17) se define como el cociente entre el gasto másico realmente impulsado por la bomba y el total que pasa por el rodete. Donde  $\dot{M}_F$  representa el gasto másico total de fuga, suma de fuga hacia el exterior

más de recirculación. El rendimiento orgánico (ecuación 1.18) se define como el cociente entre la potencia interna y la suministrada al eje de la bomba.

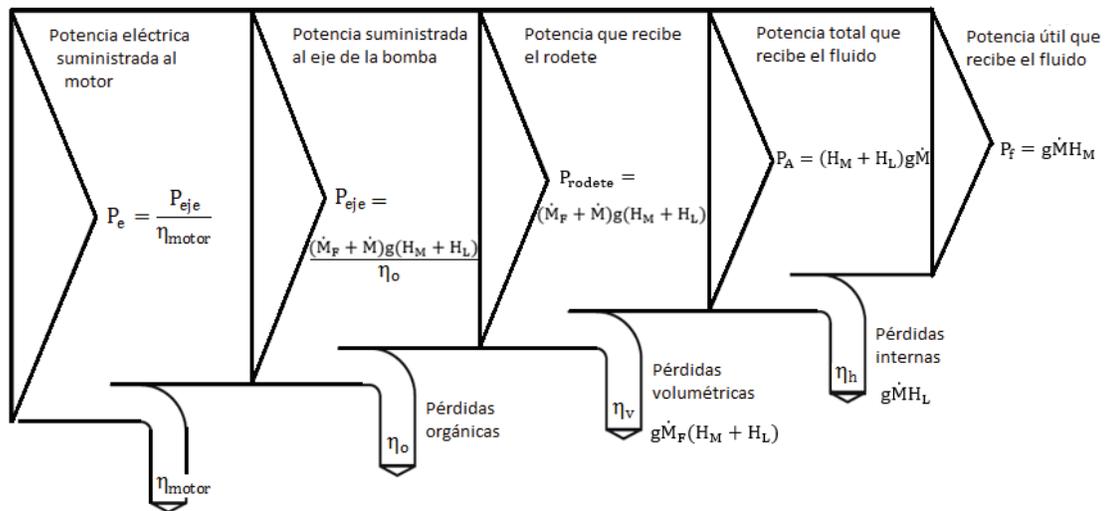
$$\eta_v = \frac{\dot{M}}{\dot{M}_F + \dot{M}} \quad (1.17)$$

$$\eta_o = \frac{P_{\text{rodete}}}{P_{\text{eje}}} \quad (1.18)$$

Donde:

- $P_{\text{eje}}$ , representa el producto de la potencia eléctrica por la eficiencia del motor:  
 $\eta_{\text{motor}} * P_E$ .
- $P_{\text{rodete}}$ : Potencia que requiere el rodete y que puede considerarse como potencia interna, superior al que recibe el fluido que sale de la bomba. La expresión que le relaciona con los demás parámetros de peso en el sistema, es la siguiente:

$$P_{\text{rodete}} = (\dot{M}_F + \dot{M})g(H_M + H_L) \quad (1.19)$$



**Figura 2.18** Energías de una bomba centrífuga (IDAE, 2012)

La Figura 2.18 muestra el diagrama de Sankey de energías de una bomba centrífuga.

### 2.3.1 DINÁMICA ESPECÍFICA DE LOS SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN

En los sistemas de recirculación la energía mecánica proporcionada por la bomba  $H_B$  se destina únicamente a vencer las pérdidas (IDAE, 2012). Por tanto:

$$H_B = H_L \quad (1.20)$$

En este caso,  $H_L$  representa las pérdidas en el sistema de recirculación, la cual está compuesta por la suma de las pérdidas por fricción en los tubos, pérdidas en accesorios y la sumatoria de las pérdidas en equipos  $H_{\text{equipos}}$  tales como intercambiadores de calor o baterías. La ecuación 1.21 queda expresado de la siguiente manera:

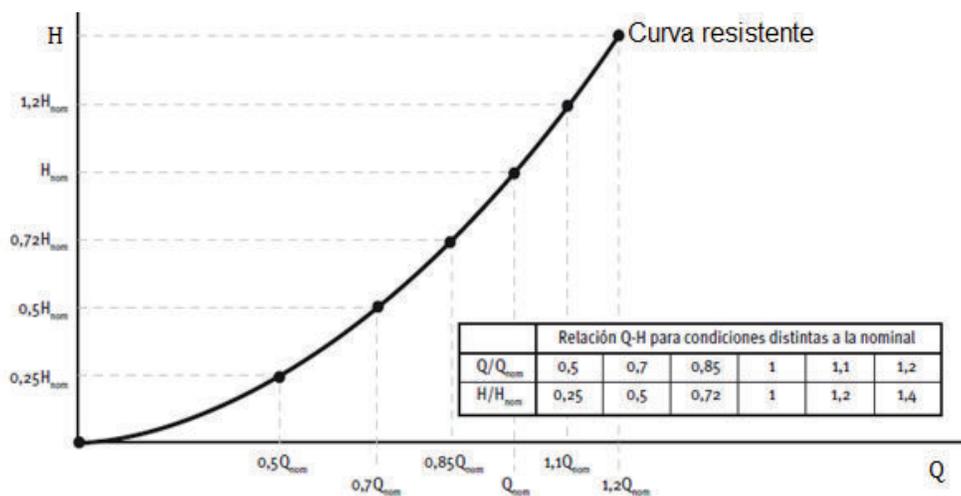
$$H_L = H_{L,\text{tub}} + \sum H_{L,\text{acc}} + \sum H_{\text{equipos}} \quad (1.21)$$

Es decir,

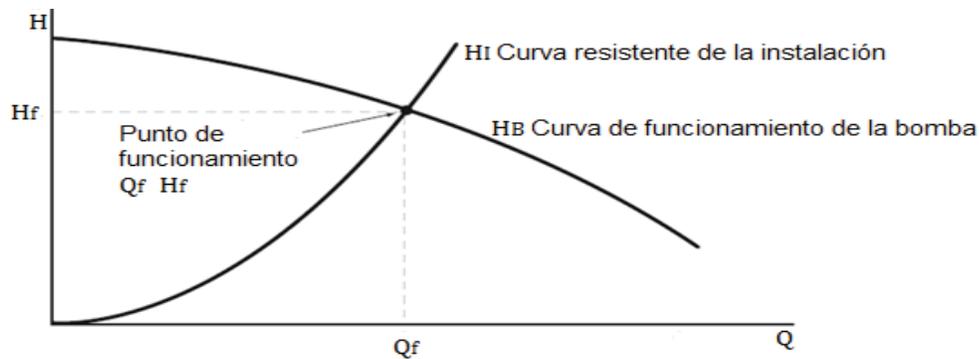
$$H_L = f \left( \frac{V^2}{2g} \right) \left( \frac{L}{D} \right) + \sum K \left( \frac{V^2}{2g} \right) + \sum H_{\text{equipos}} \quad (1.22)$$

La resistencia que ofrece una instalación de recirculación en particular, es igual a la pérdida  $H_L$ . Dicha resistencia se relaciona con el caudal  $Q$  de manera cuadrática.

$$H_L \propto Q^2 \quad (1.23)$$



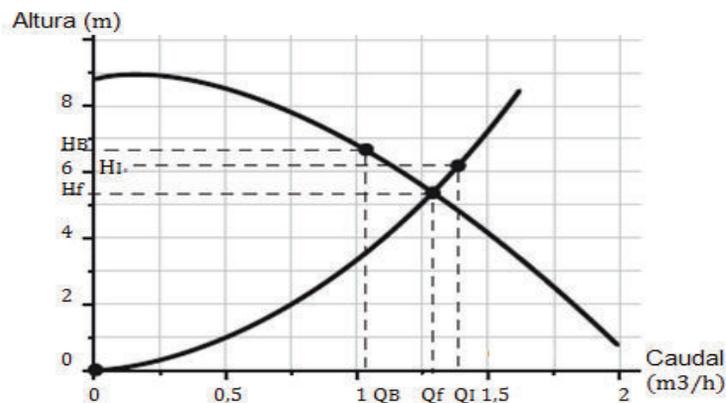
**Figura 2.19** Curva de la Instalación. Relación entre altura y caudal (IDAE, 2012)



**Figura 2.20** Punto de operación de la bomba en un Sistema de Recirculación (IDAE, 2012)

En la práctica, se calcula el punto de funcionamiento de la instalación, la resistencia o pérdida que ofrece cuando por ella circula el caudal nominal. En la Figura 2.19, se visualiza tal relación para diferentes valores del punto nominal. La Figura 2.20, muestra la intersección entre la curva característica de la bomba y la curva de la instalación, lo que da como resultado el punto de operación.

El punto de funcionamiento de la instalación debe garantizar que la bomba proporcione el caudal deseado, es decir, que el punto se sitúe lo más próximo al punto nominal de la instalación ( $Q_I; H_I$ ) y al punto nominal de la bomba ( $Q_B; H_B$ ).



**Figura 2.21** Comportamiento real del Punto de Operación de la Bomba (IDAE, 2012)

En la práctica, el punto de operación no coincide ni con uno ni con el otro, tal como se muestra en la Figura 2.21. Una manera de corregir esta disparidad es escoger la bomba para un caudal inferior al nominal. De esta forma, el punto de funcionamiento estará más próximo al nominal.

## 2.4 SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO

De acuerdo con (NISE, 2011), un sistema de control está compuesto por subsistemas y procesos ensamblados con el propósito de obtener una salida esperada y un desempeño deseado, dada una entrada específica. Por su parte, (SIMROCK, 2007) define que un sistema de control trata con el comportamiento de sistemas dinámicos donde la salida deseada se conoce como señal referencia, mientras un controlador manipula ciertas magnitudes (señales de entrada), tales como: voltaje, corriente, frecuencia, etc; para obtener dicha señal de referencia.

Por tanto, los sistemas de control son sistemas dinámicos. Según Ogata (1987):

Un sistema se llama dinámico si su salida en el presente depende de una entrada en el pasado. Si su salida en curso depende solamente de la entrada en curso, el sistema se conoce como estático. La salida de un sistema estático permanece constante si la entrada no cambia y cambia sólo cuando la entrada cambia. En un sistema dinámico la salida cambia con el tiempo cuando no está en su estado de equilibrio (pág. 1).

La elaboración de modelos matemáticos para sistemas dinámicos es el primer requisito para cualquier tentativa de diseño de sistemas, la cual requiere de una predicción del comportamiento del sistema como tal. Este modelo matemático es por lo general escrito en forma de ecuaciones diferenciales, las cuáles pueden ser lineales o no lineales. Las lineales a su vez pueden clasificarse en lineales invariantes en el tiempo y lineales variantes en el tiempo. En la ecuación 1.24 se visualiza un polinomio, ésta posee variables ( $x$ ), los coeficientes son constantes y sus derivadas aparecen como combinadas linealmente. En la ecuación 1.25, algunos de sus coeficientes involucran variables independientes ( $x$ ,  $t$ ). Para linealidad, la ecuación no debe incluir potencias, productos u otras funciones de las variables dependientes y sus derivadas.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 5\frac{dx}{dt} + 10x = 0 \quad (1.24)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + (1 - \cos 2t)x = 0 \quad (1.25)$$

Los sistemas dinámicos descritos por ecuaciones diferenciales lineales e invariantes en el tiempo, se denominan de igual forma, Sistemas Lineales e Invariantes en el Tiempo o Sistemas LTI (Linear Time-Invariant). Para este proyecto de investigación, sólo será considerada la situación ideal de un sistema LTI.

La transformada de Laplace es una de las herramientas más utilizadas para la resolución de ecuaciones diferenciales. La variable  $s$  es denominada el operador de Laplace, y por ser una variable compleja, tiene la siguiente forma en la ecuación:(KUO, 1996)

$$s = \sigma + j\omega \quad (1.26)$$

Dónde:

- $s$ : Variable compleja.
- $\sigma$ : Parte real.
- $j\omega$ : Parte imaginaria.

La transformada de Laplace se define como:

$$L[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} f(t) * e^{-st} dt \quad (1.27)$$

Dónde:

- $F(s)$ : Transformada de Laplace de  $f(t)$
- $L[f(t)]$ : Transformada de Laplace de  $f(t)$
- $f(t)$ : Función real en el dominio del tiempo.
- $e^{-st}$ : La exponencial elevada a la potencia  $-st$ .

En este caso en particular, la función  $f(t)$  es la ecuación diferencial. Sin embargo, rara vez se aplica esta última fórmula integral para resolver la ecuación. En su lugar, se aplican los siguientes teoremas de fácil aplicación de las funciones más comunes, lo cual le da sentido a la idea de facilitar dicha solución.

- **Multiplicación por una constante.** Sea  $k$  una constante, entonces:

$$L[k * f(t)] = k * F(s) \quad (1.28)$$

- **Suma y Resta.** Sean  $F_1(s)$  y  $F_2(s)$  las transformadas de Laplace de  $f_1(t)$  y  $f_2(t)$ , entonces:

$$L[f_1(t) + f_2(t)] = F_1(s) + F_2(s) \quad (1.29)$$

- **Diferenciación.** La transformada de Laplace de la derivada de  $f_t$  con respecto al tiempo es:

$$L\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = sF(s) - f(0) \quad (1.30)$$

- **Integración.** La transformada de Laplace de la integral de  $f_t$  con respecto al tiempo es:

$$L\left[\int_0^t f(\tau) d\tau\right] = \frac{F(s)}{s} \quad (1.31)$$

- **Traslación en el tiempo.** La transformada de Laplace de  $f(t)$  retrasada un cierto tiempo  $\mathcal{T}$  es igual a la transformada de Laplace de  $f(t)$  multiplicada por  $e^{-\mathcal{T}s}$ , visto en la ecuación 1.28.

$$L[f(t - \mathcal{T})U_s(t - \mathcal{T})] = e^{-\mathcal{T}s}F(s) \quad (1.32)$$

- **Teorema del Valor Inicial.** Si la transformada de Laplace de  $f(t)$  es  $F(s)$ , entonces:

$$\lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} sF(s) \quad (1.33)$$

- **Teorema del Valor Final.** Si la transformada de Laplace de  $f(t)$  es  $F(s)$ , entonces:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s) \quad (1.34)$$

La solución a una ecuación diferencial mediante la transformada de Laplace, en forma racional en  $s$ , es también conocida como la función de transferencia  $G(s)$ , cuando relaciona la salida  $Y(s)$  de un sistema con su entrada  $X(s)$ .

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (1.35)$$

La función de transferencia se utiliza ampliamente en teoría de control, para el análisis, diseño y síntesis de sistemas de control, caracterizando relaciones entrada-salida. A continuación, se presentan algunas conclusiones:(OGATA K. , 1998).

- La función de transferencia de un sistema es un modelo matemático que expresa la ecuación diferencial que se representa como la relación entre la variable de salida y la variable de entrada.
- Es una propiedad del sistema, independiente de la señal de excitación del mismo.
- No proporciona información sobre la estructura física del sistema.
- Conociendo la función de transferencia del sistema, se puede estudiar su comportamiento para diferentes entradas o señales de excitación.

#### 2.4.1 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE CONTROL

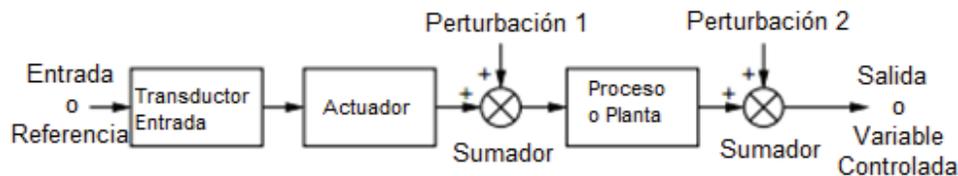
Un sistema de control automático está conformado principalmente por sensores, actuadores, controladores, plantas, señales de entrada y de salida (OGATA K. , 1998). Al analizar los sistemas de control, es necesario establecer ciertas definiciones básicas:

- **Variable controlada y manipulada:** la variable controlada es la cantidad o condición que se mide y se controla, mientras que la variable manipulada es la condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada; ya que por lo general es la salida del sistema. Por ello, controlar implica medir el valor de la variable controlada y luego aplicar la variable manipulada para corregir una desviación en el valor hasta alcanzar un valor deseado.
- **Planta:** puede ser como uno o un conjunto de partes de un sistema, que tienen la función de ejercer una función específica.
- **Sensores:** dispositivos capaces de detectar magnitudes físicas o químicas (CREUS, 1998)

- **Actuadores:** es un dispositivo cuya función es proveer de fuerza para mover o actuar sobre otro dispositivo. Dependiendo del origen de la fuerza puede ser clasificado como neumático, hidráulico, eléctrico, etc (VILDÓSOLA C, 2015).
- **Controladores:** determina el comportamiento del sistema en lazo cerrado, ya que coloca una o varias condiciones para el actuador en función del error obtenido.

#### 2.4.2 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA EN LAZO ABIERTO Y CERRADO

La característica distintiva de los sistemas de control a lazo abierto es que no pueden compensar la acción de señales de perturbación (Perturbación 1, 2) que se suman a la señal que sale del controlador o de la planta, corrompiendo y alterando los resultados esperados, según se puede observar en la Figura 2.22.



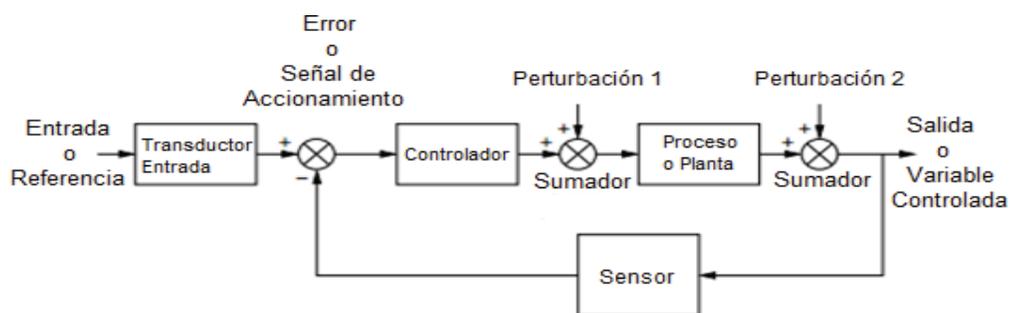
**Figura 2.22** Sistemas de Control a Lazo Abierto (NISE, 2011)

El sistema está compuesto por un transductor que transforma la entrada de referencia en el tipo de señal que requiere el controlador en su entrada (por lo general, una señal eléctrica). El amplificador manda las señales de activación al proceso o planta; esta operación entrega a la salida el nivel de la señal, o el valor de la variable, que se espera. Como ejemplo, en un sistema de aire acondicionado, donde la señal de referencia es el valor de la temperatura medido en el ambiente. Pero estos valores de temperatura no pueden ser controlados ya que no existe un lazo de realimentación para que el sistema de control identifique la señal, haga su evaluación y determine la temperatura necesaria para el sistema de aire acondicionado.

Otro ejemplo, un tostador calienta la rebanada de pan, pero no supervisa si el pan está aún tibio o se está quemando. El tostador sigue calentando el pan, sin señal

de realimentación que le permita detectar el nivel de temperatura adecuado para que no se queme el pan. Por tal motivo, se debe tener un bucle de realimentación, es decir tener un sistema en lazo cerrado (Figura 2.23), ya que adquiere ventajas como:

- Ser menos sensible a perturbaciones y a cambios en las características de los componentes.
- Se incrementa la velocidad de respuesta del sistema
- Los valores reales y medidos son más exactos.



**Figura 2.23** Sistemas de Control a Lazo Cerrado (NISE, 2011)

El transductor transforma la señal de entrada o referencia en el tipo de señal que requiere el controlador. Luego, esta se resta con la señal del sensor que también cumple con los requerimientos de entrada del controlador, provista por un sensor que actúa como transductor de la señal de salida de la planta. Como ejemplo, un calentador demanda cierto valor de temperatura, para medir y graduar la misma, se utiliza un sensor capaz de detectar este valor; transformado a voltaje para que se compare y controle con el valor deseado.

La diferencia entre las señales de referencia y la señal proveniente del sensor, es denominada señal actuante o error. Mediante esta medida de la salida, los sistemas a lazo cerrado son capaces de corregir las distorsiones provocadas por las señales de perturbación que se suman a la salida del controlador o en la misma salida del sistema. Esta característica representa la ventaja de los sistemas de control con Feedback (retroalimentación), ya que son menos sensibles al ruido, la perturbación o los cambios provocados por el medio ambiente.

## 2.5 SOFTWARE MATLAB

La palabra Matlab viene de Matrix Laboratory (Laboratorio de matrices). Todas las variables en Matlab son matrices, es decir, sólo tiene este tipo de datos y un extenso conjunto de rutinas para obtener resultados gráficos. Matlab es un programa que posee ciertas características, tales como:(HOUCQUE, 2005)

- Ayuda a resolver problemas matemáticos en el campo científico y en la ingeniería.
- Es un lenguaje de alto nivel, para el análisis técnico computacional, capaz de integrar visualizaciones con el uso de herramientas gráficas:
  - Simulink, el cual utiliza una interfaz gráfica para el usuario o GUI (Interfaz Gráfica al Usuario)
  - El visor LTI, que permite obtener medidas directamente de las curvas de respuesta en tiempo o en frecuencia
  - SISO Design Tool (herramienta para el diseño de sistemas Single Input Single Output)
  - El Symbolic Math Toolbox, para salvar cálculos simbólicos requeridos en el análisis de los sistemas de control. Contiene estructuras de datos sofisticadas, herramientas de depuración y programación orientada a datos.

Matlab fue diseñado originalmente para el análisis numérico y control lineal de sistemas; en consecuencia, es ideal para la manipulación de matrices numéricas. Adicional a estas ventajas, Matlab posee varios toolboxes (caja de herramientas) que proveen de soluciones en áreas específicas como el procesamiento de señales, diseño y análisis de sistemas de control, sistemas de potencia, gráficas en 3D, etc. En este proyecto de investigación se utilizó Matlab Control System Toolbox (Caja de herramientas para el análisis y diseño de sistemas de control), una expansión de Matlab que incluye comandos específicos de sistemas de control.

## **CAPÍTULO 3**

### **PROPUESTA METODOLÓGICA**

#### **3.1 METODOLOGÍA**

En el presente proyecto, se va a dar un seguimiento a las bombas eléctricas tanto en instalaciones domésticas como industriales. Este proyecto está centrado en simular sistemas de control para bombas de recirculación y sistemas de bombas en paralelo. Para ello se ha considerado ciertos factores para cumplir con dicho propósito, enunciados a continuación:

- Búsqueda de información referente a modelos ya existentes en el mercado. Además, consultar bibliografía útil para desarrollar el modelo matemático.
- Realizar el modelo matemático mediante funciones de transferencia de cada una de las partes del sistema y simular el proceso a través del programa Simulink de Matlab. De tal forma, que se desarrolle la simulación del control automático.
- Y por último generar tablas, esquemas y figuras mediante la simulación, en donde se pueda observar todos los resultados obtenidos para las distintas variables.

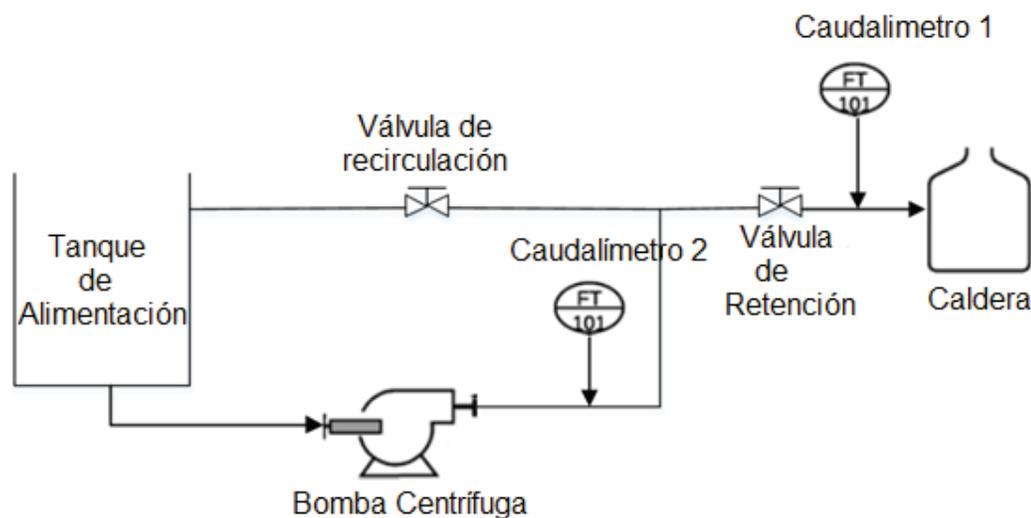
#### **3.2 FORMULACIÓN DE LA METODOLOGÍA**

##### **3.2.1 SELECCIÓN DEL PROCESO A SIMULAR**

Para la simulación de la medición y control de caudal se consideran tres aplicaciones, las cuáles se identificarán y analizarán cada uno de los elementos que conforma el sistema.

### 3.2.1.1 Sistemas de Recirculación para una Caldera

Se presenta el caso de una bomba de agua de alimentación a una caldera de una central termoeléctrica. Cuando el caudal que se utiliza en el sistema de refrigeración de la caldera es muy bajo, se pueden producir daños irreversibles en los internos de la caldera. Se precisa mantener un caudal mínimo de refrigeración mediante recirculación al tanque de agua de alimentación a la bomba según se ilustra en la Figura 3.1.



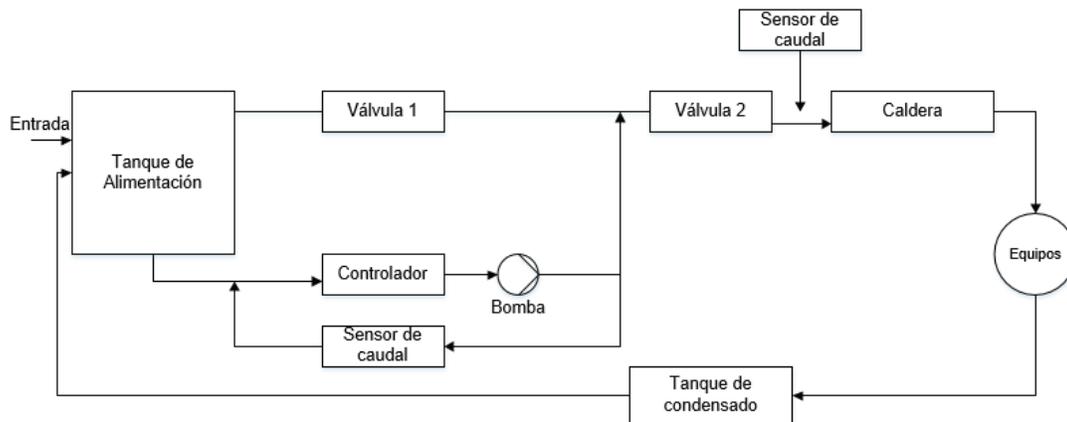
**Figura 3.1** Sistema de recirculación para caldera (Dalgo y Loachamín)

El elemento primario de medida para el control será el caudalímetro 1. El elemento de actuación del lazo de control opera: con la apertura de la válvula en la línea de recirculación y la acción de la bomba al paso de caudal.

- **Variable a controlar:** nivel del caudal.
- **Variable manipulada:** tasa de flujo modificado por la bomba.

Cuando el caudal está muy bajo, el sistema indicará al usuario cerrar la válvula de retención, lo que impide el paso del flujo hacia la caldera; se abre la válvula de recirculación y se establece un sistema de recirculación en el que la bomba deberá recuperar las pérdidas de caudal. El mecanismo que desactiva la recirculación es la bomba mediante el caudalímetro 2 que se puede observar en la Figura 3.2, mientras regula la tasa de flujo hasta lograr un nivel especificado de

caudal. Se comprende entonces que la recirculación, y por tanto la acción del controlador aplicado a la bomba para recuperar pérdidas, se desactiva cuando el caudal ha alcanzado el nivel adecuado, al que se denomina nivel de referencia  $Q_R$ .



**Figura 3.2** Sistema de control para la recirculación en una caldera (Dalgo y Loachamín)

### 3.2.1.2 Sistema de Agua Caliente Sanitaria

En segundo lugar, se presenta el caso de la producción de agua caliente sanitaria. Las instalaciones que dan servicio de Agua Caliente Sanitaria (ACS) normalmente se realizan junto con la calefacción. Dichas instalaciones pueden ser: de producción individual (edificios de viviendas), de producción central o colectiva (hoteles, hospitales y viviendas) (RENEDO, 2015).

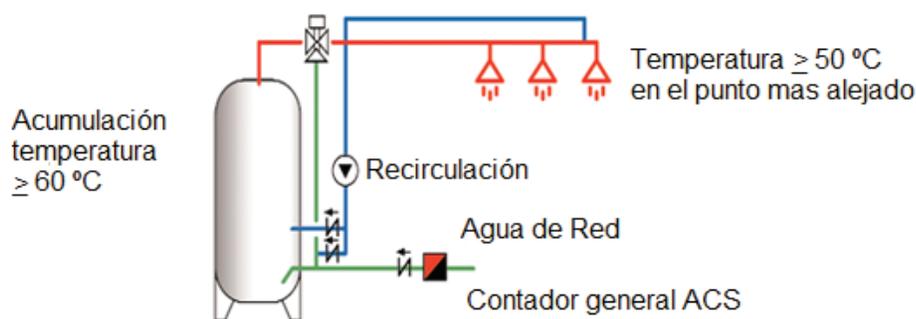
Según García (2008), la manera de clasificar estas instalaciones es tomando en cuenta las formas principales de producción del agua caliente sanitaria en un edificio:

- **Instantánea:** Consiste en un intercambiador de calor dimensionado para la potencia instantánea máxima (caudal punta).
- **Por acumulación:** para reducir la potencia necesaria, el agua caliente se acumula en depósitos de manera que se disponga de una reserva para el momento de máxima demanda.

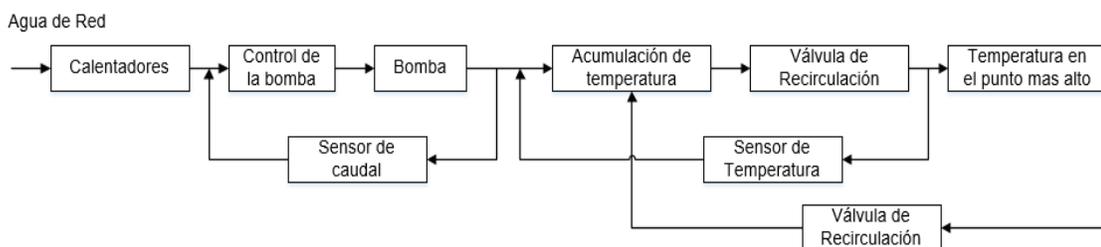
- **Por semi-acumulación:** el sistema de acumulación tiene depósitos con un menor volumen que el anterior, por lo que el agua acumulada cubre un período de punta de consumo más breve. Se requiere mayor potencia de calderas que en el caso de sistemas de acumulación.

En este sistema por lo general se busca un mayor ahorro de energía debido a las pérdidas por transferencia de calor en las tuberías, en donde “la temperatura máxima de preparación de 58 °C, promoviendo asimismo mayores volúmenes de acumulación, y menores potencias de producción” (RENEDO, 2015, pág. 31).

Cuando la producción de agua caliente es centralizada, un sistema de calderas alimentadas por combustibles líquidos o gaseosos, suministra la energía que calienta el fluido caloportador, el cual finalmente aportará esta energía al agua caliente sanitaria, bien a través de serpentines de calentamiento o de intercambiadores Figura 3.4. Un esquema de una instalación centralizada con sistema de acumuladores se presenta en la Figura 3.3.



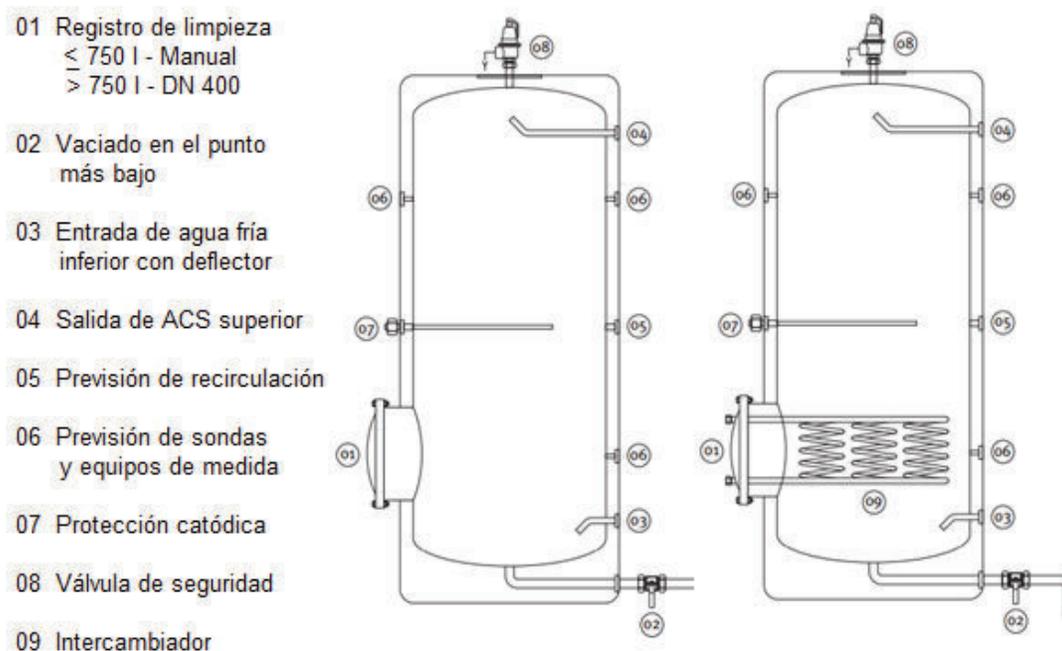
a



b

**Figura 3.3** Reglamentación de Distribución de ACS (RENEDO, 2015)

La distribución de agua caliente sanitaria entre el acumulador y los consumidores se realiza por columnas conforme a la Figura 3.3 a, como también se puede observar el esquema del sistema de proceso con control Automático Figura 3.3 b. Todas las instalaciones de preparación y distribución de agua caliente sanitaria deberán estar provistas de un sistema de retorno de agua al equipo de preparación, dispuesto de tal manera que permita reducir al máximo el tiempo transcurrido entre la apertura del grifo más lejano de la central de producción y la llegada al mismo del agua caliente sanitaria (ACS).



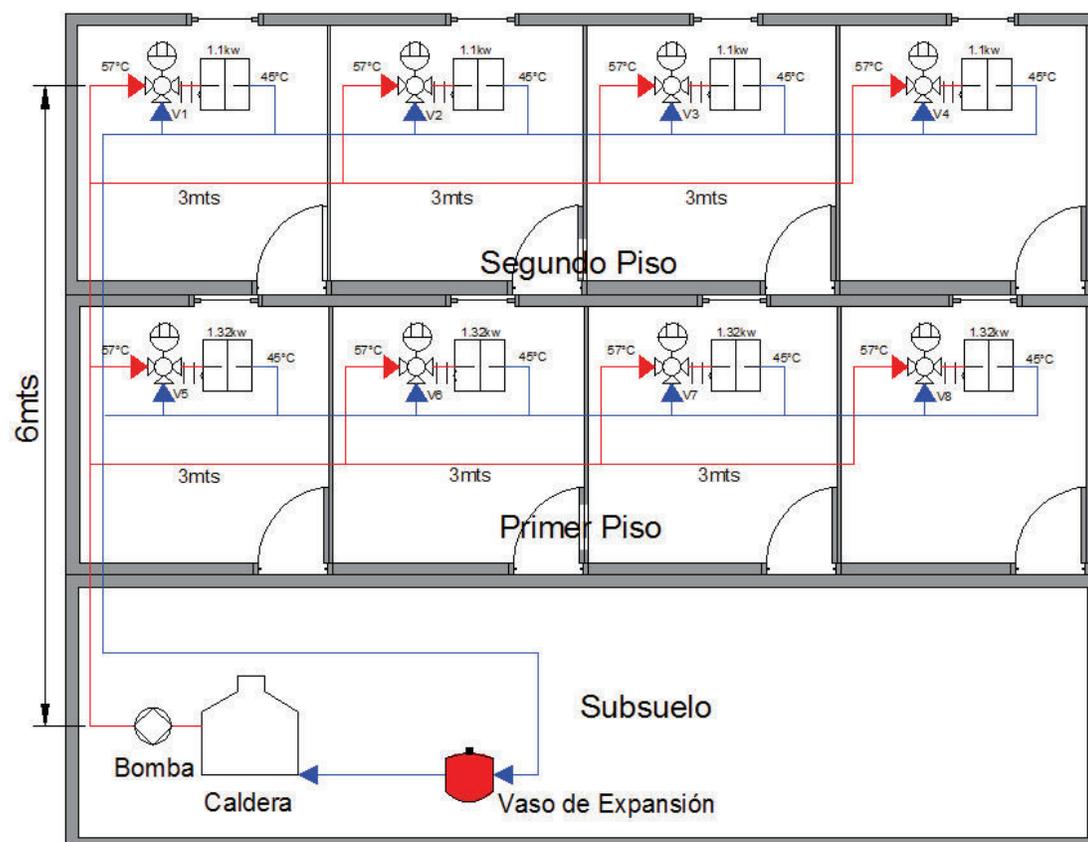
**Figura 3.4** Conexiones necesarias en acumuladores e interacumuladores (ATECYR, 2010)

El caudal de la bomba se calculará considerando una caída máxima de temperatura de 3°C entre el depósito acumulador y el usuario más lejano, mientras que su presión se calcula considerando las pérdidas de carga del circuito de retorno. De los sistemas intercambiadores de calor, el que presenta una buena eficacia energética en la transmisión y además una mayor facilidad en la limpieza es el intercambiador de placas y está ubicado en la parte externa del acumulador.

### 3.2.1.3 Sistema de Calefacción

El aire exterior utilizado para ventilar las viviendas, entra a las mismas a cierta temperatura ya se baja o alta, por lo que es necesario controlar dicha temperatura y tener confort del ambiente. Dicha compensación se acostumbra lograr a través del sistema de calefacción. Para lograr esta calefacción el dispositivo más utilizado es el radiador, los cuáles deben poseer la potencia adecuada para alcanzar la temperatura de confort.

Este sistema de calefacción es aplicable en la región sierra del país, que en ocasiones se tiene temperaturas bajas. Los sitios donde pueden ser aplicados estos sistemas son hospitales, oficinas ubicas en elevaciones, como por ejemplo las que se encuentran en el teleférico de Quito, centros de salud, ancianitos, albergues, centros de asilo para personas con cáncer, etc.

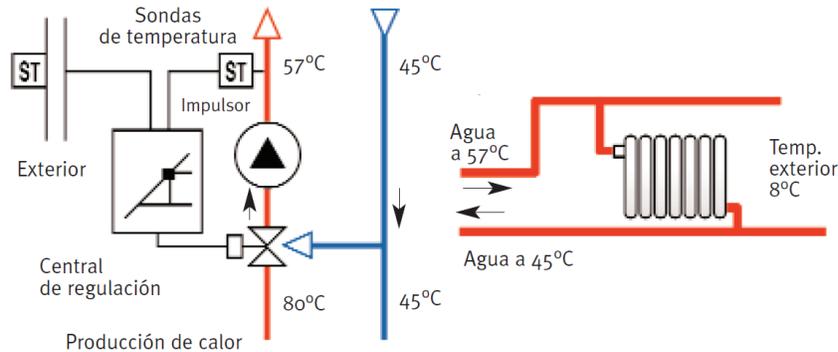


**Figura 3.5** Instalación de Calefacción Doméstica con Regulación de Temperatura (IDAE, 2012)

Desde este punto de vista, el lugar más adecuado para colocar el radiador es la pared más fría de cada habitación, es decir la que da al exterior, por lo que el radiador debe colocarse próximo a la ventana para reducir el efecto pared fría. También debe tomarse en cuenta los radiadores colocados en las viviendas de planta baja y de planta alta de un establecimiento, por las pérdidas de calor debidas al contacto con la tierra o con el aire al cual está expuesto el techo. Un ejemplo de la configuración de un sistema de calefacción con bomba de recirculación se muestra en la Figura 3.5. En sistemas de control automático, el presente modelo o planta representa un sistema de lazo abierto, ya que no posee ningún tipo de control.

La potencia de calefacción de los radiadores depende de la temperatura del agua que le llega desde las calderas o los serpentines de calentamiento, del caudal que circula por su interior y de la temperatura ambiente de la habitación donde operan. Entonces, la potencia aumenta cuando circula un mayor caudal o cuando la temperatura del agua se incrementa. Para conseguir un buen funcionamiento se han desarrollado los sistemas de regulación, los cuales tienen la función de variar la emisión calorífica de los radiadores mediante la modificación de la temperatura del agua.

La regulación de la temperatura se logra mediante la instalación de una válvula mezcladora de tres vías y un controlador o central de regulación, tal como se indica en la Figura 3.6. Además, se visualiza que proporciona agua a  $57^{\circ}\text{C}$  a los radiadores, los cuáles entregan  $8^{\circ}\text{C}$  para aumentar los  $8^{\circ}\text{C}$  del exterior a  $16^{\circ}\text{C}$ , por lo que en la tubería de retorno circulará agua a  $45^{\circ}\text{C}$ , que es redirigida a la válvula mezcladora de agua proveniente de la productora de calor y aquella que regresa de los radiadores. El controlador recibe información de la temperatura del agua a la salida de la bomba de recirculación y de la temperatura exterior, a través de las sondas de temperatura, actuando sobre la válvula mezcladora para lograr los  $57^{\circ}\text{C}$  requeridos por el sistema de calefacción.



**Figura 3.6** Regulación de Temperatura (RENEDO, 2015)

Los tres sistemas presentados utilizan bombas de recirculación y válvulas. Sin embargo, dependiendo de la aplicación requerida, se tendrá uno o más controladores en base al número de actuadores existentes en el sistema.

### 3.2.2 SELECCIÓN DEL PROCESO

Para determinar el proceso con el que se va a realizar la simulación de la planta, se debe realizar un estudio detallado de criterios como:

- F1 “Sistema Multivariable”: son los componentes a controlar en el proceso.
- F2 “Utilización de Bombas de Recirculación”
- F3 “Número de Elementos del Sistema”
- F4 “Número de Tipos de Sensores a utilizar en el Proceso”
- F5 “Número de Controladores a utilizar en el Proceso”

Cada sistema posee diferentes usos, debido a que está orientado a centrales termoeléctricas, edificios y zonas residenciales, esto indica que poseen entre uno a varios componentes del sistema (actuadores, planta, sensores). El siguiente modelo dispuesto a ser utilizado nos permitirá una fácil identificación de las variables, vista en la Ecuación 1.36.

$$S_j = \sum_{i=1}^m W_i F_{ij} \quad (1.36)$$

Dónde:

- $S_j$ : Puntuación Global de cada alternativa j.
- $W_i$ : Peso ponderado de cada factor i.
- $F_{ij}$ : Puntuación de las alternativas j por cada uno de los factores i.

El modelo de factores ponderados es el siguiente:

- Factor 1: Sistema de Recirculación de una Caldera
- Factor 2: Sistema de Agua Caliente Sanitaria
- Factor 3: Sistema de Calefacción para 8 Radiadores

**Tabla 3.1** Selección del Proceso (PUENTES, 2016)

|           | <b>Ponderación</b> | <b>Factor 1</b> |            | <b>Factor 2</b> |             | <b>Factor 3</b> |             |
|-----------|--------------------|-----------------|------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| <b>F1</b> | 0.30               | 5               | 1.5        | 10              | 3           | 10              | 3           |
| <b>F2</b> | 0.20               | 10              | 2          | 10              | 2           | 10              | 2           |
| <b>F3</b> | 0.20               | 3               | 0.6        | 4               | 0.8         | 9               | 1.8         |
| <b>F4</b> | 0.15               | 9               | 1.35       | 9               | 1.35        | 9               | 1.35        |
| <b>F5</b> | 0.15               | 3               | 0.45       | 4               | 0.60        | 10              | 1.5         |
|           | 1.00               | $\Sigma$        | <b>5.9</b> | $\Sigma$        | <b>6.75</b> | $\Sigma$        | <b>9.65</b> |

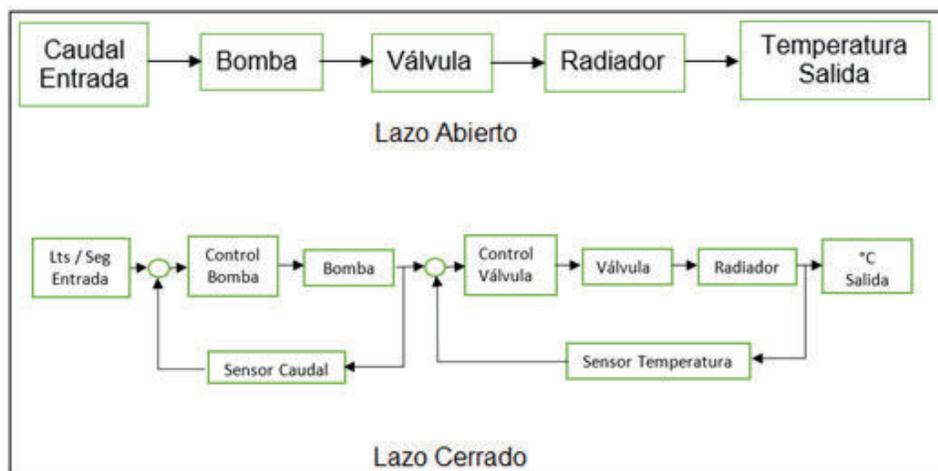
En base a la Tabla 3.1, se escoge el sistema de calefacción debido a que posee una gran cantidad de variables a diseñar y ser simulados. No obstante, hay que agregar que la complejidad del proceso se visualizará en el lazo cerrado del sistema de control automático. Por lo general, los 2 primeros procesos tienen un lazo de realimentación único hacia la señal de entrada; lo que no pasa con el tercer proceso, como posee 8 habitaciones quiere decir que posee 8 niveles de temperatura diferentes, cada uno con su propio lazo de realimentación. En el caso de la bomba, posee una similitud con los 2 primeros procesos.

En el sistema de calefacción, se considera que los actuadores son: la válvula mezcladora y la(s) bomba(s) de recirculación, ya que poseen parámetros que permiten dar confort a las personas y se evita pérdidas de agua en el sistema.

Se analizará como ejemplo, una vivienda visto en la Figura 3.5, el cual contiene:

- 2 pisos, en cada uno contará con 4 habitaciones.
- Cada habitación contará con un radiador.
- El radiador debe abastecer la potencia de 1.1 y 1.32 kW.
- La altura máxima en cada piso será de 3 metros.
- El caldero deberá abastecer una potencia de 9.68 kW; por lo tanto, puede ser uno o más calderos fijos conectados en cascada.
- Las conexiones de las tuberías dependerán del flujo de caudal necesario en cada radiador y las uniones necesarias entre el caldero y el radiador.

### 3.3 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES



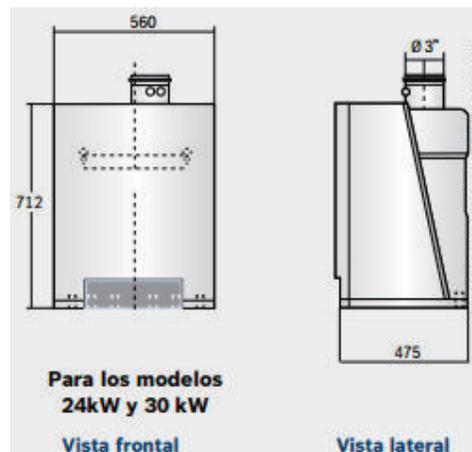
**Figura 3.7** Sistema de Calefacción mediante Diagramas de Bloques (Dalgo y Loachamín)

En la Figura 3.7, se visualiza todos los componentes sobre el proceso en general para ser estudiados mediante los sistemas de control automático, ya sea en lazo abierto y lazo cerrado (modelo real). Es fundamental realizar los procesos en lazo cerrado y colocar un controlador con el fin de estabilizar el sistema.

### 3.3.1 SELECCIÓN DE LA CALDERA

Se selecciona una caldera a gas con condensación tal como indica la Figura 3.8 a fin de cumplir las características necesarias y evitar un consumo energético alto (Anexo 1). A continuación, se indican algunos factores del caldero logamax plus GB 142/24:(BOSCH, 2016)

- Potencia Nominal: 24 kW.
- Volumen de agua en el circuito: 2.5 litros.
- Tipo de Gas: Gas Natural o LP.
- Eficiencia: más del 97%.
- Dimensiones (cm), Alto x Largo x Ancho: 71.2 x47.5x56.0.
- Tensión / frecuencia: 120 V / 60 Hz.
- Entrada del agua fría y Salida del agua caliente: 1“.



**Figura 3.8** Caldero Industrial (BOSCH, 2016)

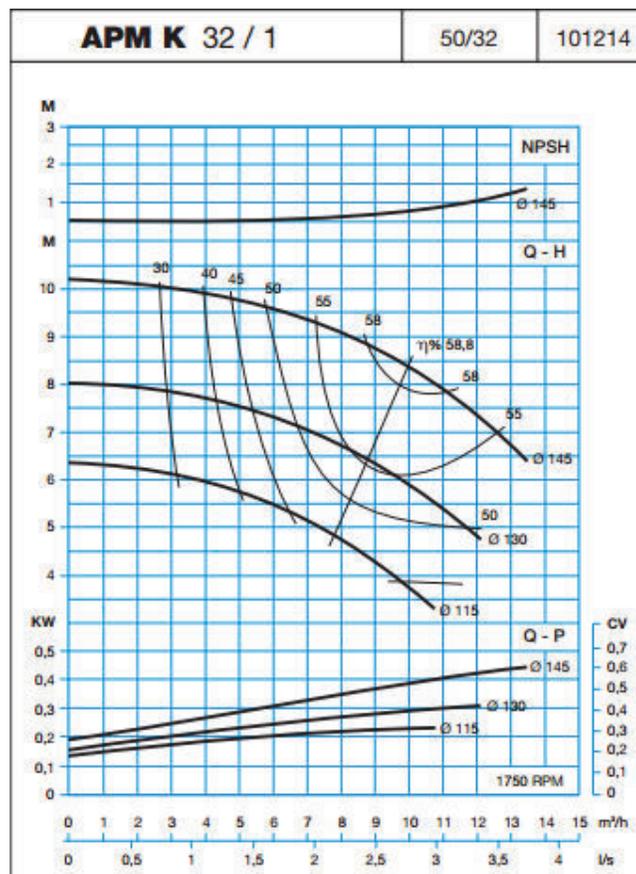
### 3.3.2 SELECCIÓN DE LA BOMBA DE RECIRCULACIÓN

El siguiente paso es la selección de los componentes del sistema de recirculación, el análisis y determinación de los parámetros que caracterizan el sistema, tales como el caudal, punto de operación de la bomba, especificaciones técnicas de la

velocidad del fluido, longitud y diámetro de las tuberías, densidad del fluido, pérdidas en las tuberías, presiones de nodos, etc.

Las compañías fabricantes de bombas han desarrollado páginas web para seleccionar los equipos, visto en la Figura 3.9. Entre ellas, se selecciona la compañía norteamericana AnsiPro(2012), la cual ofrece al mercado la Serie de Bombas APM (Anexo 2) en acero carbono. Estas bombas son intercambiables con otras series tales como la Goulds 3196, Peerless 8196, Griswold 811, Summit 2196, ISO 2858 y Xylem.

Empleando como criterio de diseño un salto de temperatura del fluido de 12°C, como sucede en el sistema de la Figura 3.6; un caudal que debe pasar por 4 radiadores de 1.1 kW y 4 radiadores de 1.32 kW, en nuestro diseño los radiadores de mayor potencia van ubicados en el primer piso y los radiadores de menor potencia van ubicados en el segundo piso, visto en la Figura 3.5.



**Figura 3.9** Curva Característica de la Bomba AP de Caudal vs Altura y Caudal vs Potencia (BOMBASIDEAL, 2017)

Por tanto, el caudal que debe pasar por la bomba de recirculación se calcula mediante la siguiente ecuación:(IDAE, 2012)

$$P * t = m * C_p * \Delta T \quad (1.36)$$

Dónde:

- P: potencia disipada en el radiador por unidad de tiempo.
- m: masa.
- t: tiempo.
- $C_p$ : calor específico del agua.
- $\Delta T$ : Salto de temperatura.

$$9,680 \text{ [kW]} = \frac{m}{t} * 4.180 \left[ \frac{\text{s} * \text{kW}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} \right] * (12) [^\circ\text{C}]$$

$$M = \frac{m}{t} = 0.193 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Utilizando la fórmula del gasto másico que es la fluidez de la masa por segundo, donde:  $M = \rho * Q$ .

- M: gasto másico.
- $\rho$ : densidad del agua  $\left(1 \frac{\text{kg}}{\text{l}}\right)$ .
- Q:caudal.

La bomba de recirculación debe impulsar un caudal de:

$$Q = \frac{M}{\rho} = \frac{0.193 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 0.193 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 0.69 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 193 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

Para los fines de esta investigación se simula un sistema con una tubería de longitud de elevación (6 metros) de la vivienda visto en la Figura 3.5 y un caudal promedio de  $0.68 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ . Entre ellas se selecciona una bomba centrífuga APMK32.

### 3.3.3 SELECCIÓN DEL SENSOR PARA LA MEDICIÓN DE CAUDAL

Se selecciona un sensor de caudal para el agua dentro de las tuberías con el objetivo de saber la cantidad de agua circulante y enviar esa información para que el controlador envíe a la bomba, la impulsión de agua necesaria a los radiadores para tener un buen funcionamiento del mismo. Dicho sensor posee las siguientes características:(MARQUEZ, 2014)



**Figura 3.10** Sensor de Caudal (MARQUEZ, 2014)

- Modelo: YF-S201 (Anexo 5).
- Tipo de Sensor: Efecto Hall.
- Voltaje de funcionamiento [Vdc]: 5 a 18.
- Voltaje de Salida: 5 V.
- Trabajo Caudal [litros/minuto]: 1 a 30.
- Temperatura de funcionamiento: -25 a 80 °C.
- Tamaño: 2.5"x1.4"x1.4.

### 3.3.4 SELECCIÓN DE LA VÁLVULA DE CONTROL

Se selecciona una válvula de control de flujo operada por medio de un actuador de posición lineal (Figura 3.11), los cuáles colocan el macho de la válvula en el orificio en respuesta a una señal proveniente de un controlador automático que será seleccionado más adelante. Para sistemas de refrigeración, calefacción, ventilación y circuitos de derivación se utilizan válvulas de tres vías dependiendo

de las aplicaciones requeridas. En la Tabla 3.2, se visualiza las características de la Válvula TR24-SR-T US de control caracterizado.



**Figura 3.11** Válvula de Control de tres vías “mezcladora” (BELIMO, 2016)

**Tabla 3.2** Características de la Válvula TR24-SR-T US(BELIMO, 2016)

| <b>Especificaciones de Válvula (Anexo 3)</b> |                        |
|--|------------------------|
| Servicio                                     | Agua fría y caliente   |
| Acción                                       | 95° de rotación máxima |
| Tamaños                                      | 1/2", 3/4"             |
| Rango de temperatura media                   | -18 °C a 100 °C        |
| <b>Especificaciones de Actuador</b>          |                        |
| Consumo                                      | 0.5 W                  |
| Estándar de calidad                          | ISO 9001               |

### 3.3.5 SELECCIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA E INTERCAMBIADOR DE CALOR

Para condiciones de diseño, se escoge un sensor lineal y que cumpla con los límites de temperatura, en este caso se utiliza un sensor LM35 (Anexo 4), cuyas características son las siguientes:(ALLDATASHEET, 2016)

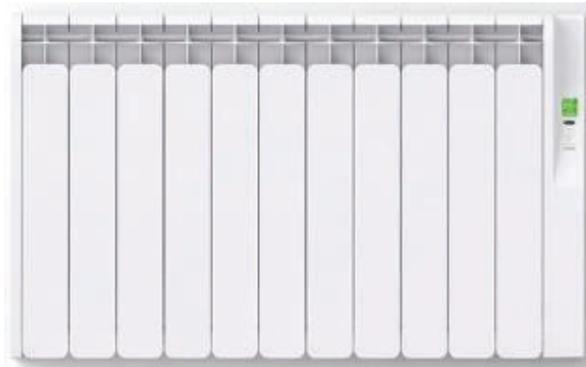
- Calibración directa en °C.
- Rango de temperatura: -55 °C a 150 °C.

- Operación de Alimentación: 4 a 30 V.
- Salida lineal: +10 mV/°C.

Se escoge un intercambiador de calor o radiador industrial (Figura 3.12) SYGMA (Anexo 6), el cual posee las siguientes características en la Tabla 3.3.(ROINTE, 2016)

**Tabla 3.3** Modelo de Radiadores (ROINTE, 2016)

| Modelo     | Número Elementos | Potencia kW | Tensión V | Altura cm | Ancho cm | Profundidad cm |
|------------|------------------|-------------|-----------|-----------|----------|----------------|
| SRN1100RAD | 10               | 1.1         | 230       | 57.5      | 90.7     | 9.8            |
| SRN1300RAD | 12               | 1.32        | 230       | 57.5      | 106.9    | 9.8            |



**Figura 3.12** Radiador B3 800/100 (ROINTE, 2016)

- Contenido de agua litros para radiador de 1.1 y 1.32 kW: 0.76 y 0.92 litros, sacado de la ecuación 1.57.
- Tubería de entrada y salida de agua, radio: ½ “.

En base a la Figura 3.5, se visualiza que el radio de las tuberías dependerá de la velocidad con la que fluye el agua y del área en base a la distancia hasta la válvula; mediante las siguientes fórmulas:(CREUS, 1998)

$$Q \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = 3600 * \left( \text{velocidad} \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) * \text{área}(\text{m}^2) \right) \quad (1.37)$$

$$\text{Area} = \pi * \frac{D^2}{4} \quad (1.38)$$

$$\text{Velocidad} \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = \frac{\pi * D * \text{RPM}}{60} \quad (1.39)$$

Donde D es diámetro de la tubería; combinando las tres ecuaciones anteriores se determina una fórmula general para realizar cualquier cálculo:

$$D \text{ (m)} = \sqrt[3]{\frac{Q}{15 * \pi^2 * \text{RPM}}} \quad (1.40)$$

Entonces, se tiene una bomba que opera a 1750 rpm con un caudal de  $1.46 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ . Se escoge una bomba centrífuga APMK32. El diámetro de la salida de la caldera es:

$$D(\text{mm}) = 1000 * \sqrt[3]{\frac{1.46}{15 * \pi^2 * 1750}} = 18(\text{mm}) \Rightarrow \text{DN20} = \frac{3}{4}''$$

Si opera con dos bombas en paralelo, su caudal se duplica; por lo tanto, el diámetro de la tubería es:

$$D(\text{mm}) = 1000 * \sqrt[3]{\frac{2.92}{15 * \pi^2 * 1750}} = 22(\text{mm}) \Rightarrow \text{DN20} = \frac{3}{4}''$$

Existen diámetros en las tuberías ya estandarizados, por lo tanto, los diámetros de 18 y 22 mm van con un diámetro nominal DN20 que equivale a  $\frac{3}{4}''$ . Los cálculos de dimensionamiento a las entradas de los radiadores de 1.1 y 1.32 kW, se calculan de la siguiente manera:

- Para los 4 radiadores de 1.1 kW con caudal de  $0.31 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

$$D(\text{mm}) = 1000 * \sqrt[3]{\frac{0.31}{15 * \pi^2 * 1750}} = 11(\text{mm}) \Rightarrow \text{DN10} = \frac{3}{8}''$$

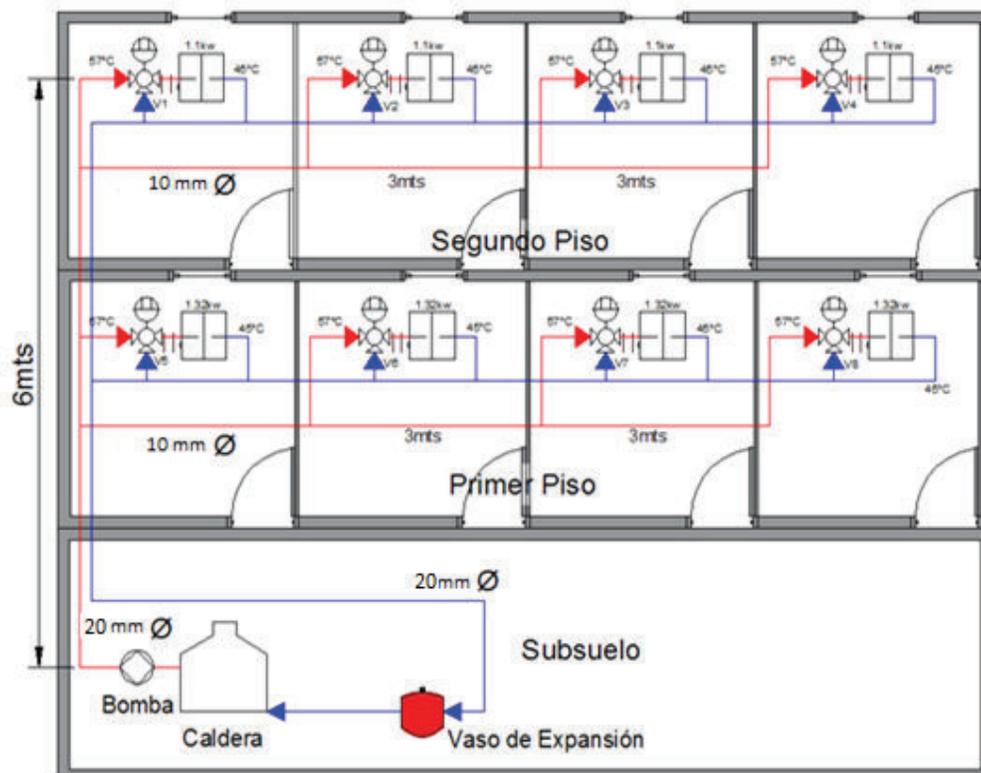
- Para los 4 radiadores de 1.32 kW con caudal de  $0.37 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

$$D(\text{mm}) = 1000 * \sqrt[3]{\frac{0.38}{15 * \pi^2 * 1750}} = 11(\text{mm}) \Rightarrow \text{DN10} = \frac{3}{8}''$$

De la Figura 3.5, se establecen medidas de longitud de las tuberías y colocadas en la Figura 3.13; la altura de cada piso es de 3 metros y se coloca una T para dividir los caudales en base a la Tabla 3.6. El material de las tuberías dependerá del factor temperatura, para este caso se utilizará tuberías de polipropileno por donde circula agua caliente a temperatura entre 45 – 80 °C visto en la Tabla 3.5 y PVC para tuberías donde circula agua fría para temperaturas inferiores a 25 °C, visto en la Tabla 3.4.(PLASTIGAMA, 2016)

**Tabla 3.4** Tuberías para Agua Caliente y Fría(PLASTIGAMA, 2016)

| Estado del Agua | Material de Tubería | Temperatura °C | Diámetros mm (Tuberías)                                     |
|-----------------|---------------------|----------------|---|
| Caliente        | Polipropileno       | +20 a 95       | 10, 15, 20, 25, 40, 50, 75 y 90                             |
| Fría            | PVC                 | -15 a 60       | 10, 15, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 75, 90, 110, 125, 160, etc. |



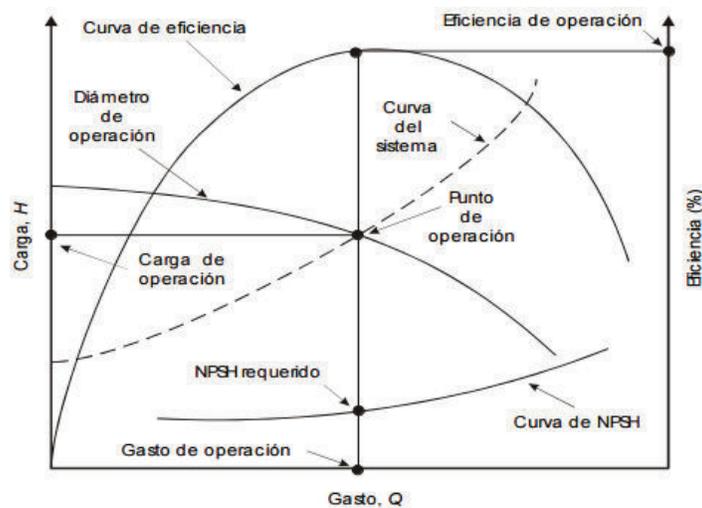
**Figura 3.13** Longitud y Diámetros de Tuberías del Sistema de Calefacción (IDAE, 2012)

El aumento de temperatura del líquido provoca un aumento de volumen en las tuberías, de tal manera que se utiliza un vaso de expansión con una capacidad de 30 litros de tipo AMF-PLUS y 10 bares de presión (Anexo 7), para que dicho líquido se expanda en el vaso.

### 3.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA EL SISTEMA DE CALEFACCIÓN

#### 3.4.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA LA BOMBA DE RECIRCULACIÓN

Para el cálculo de las pérdidas que debe reponer la bomba, se asume que el tanque de agua fría está a la altura del piso y se toman en cuenta la longitud, resistencia y diámetro de las tuberías. Así como también, se consideran las pérdidas por accesorios.



**Figura 3.14** Curva característica de la Bomba Centrífuga (PRIAS, 2002)

La curva característica para esta configuración se presenta en la Figura 3.9. Es posible determinar la función de transferencia para la bomba, mediante algunas

consideraciones. De acuerdo con las ecuaciones 1.15 y 1.20, la potencia entregada por la bomba  $P_B$  es:

$$P_B = H_L g \dot{M} \quad (1.41)$$

Donde  $H_L = f\left(\frac{V^2}{2g}\right)\left(\frac{L}{D}\right)$  debido a las tuberías, y  $\dot{M} = \rho Q$ .

En un sistema de recirculación, la bomba no necesita aumentar la velocidad del flujo y las dimensiones de la tubería permanecen fijas, por lo que estas variables de velocidad y diámetro permanecen constantes. Por tanto, el producto de  $H_L * g * \rho$  es una constante  $k_B$ , y la Ecuación 1.38 se expresa de la siguiente manera:

$$P_B = k_B * Q \quad (1.42)$$

El rendimiento del sistema  $\eta_{\text{sistema}}$  es:

$$\eta_{\text{sistema}} = \frac{P_B}{P_{\text{eje}}} \quad (1.43)$$

Al colocar  $P_B$  en la ecuación 1.44, queda lo siguiente:

$$Q = \frac{\eta_{\text{sistema}}}{k_B} * P_{\text{eje}} \quad (1.44)$$

La ecuación refleja una relación proporcional entre la entrada  $P_{\text{eje}}$  y la salida  $Q$  de una bomba centrífuga trabajando en un sistema de recirculación, ya que el cociente  $\frac{\eta_{\text{sistema}}}{k_B} = k$  es una constante. Se expresa las gráficas del caudal  $Q$  con respecto a la potencia  $P_{\text{eje}}$  suministrado a la bomba centrífuga. Por tanto, la relación lineal entre  $Q$  y a  $P_{\text{eje}}$  es proporcionada mediante la Figura 3.14.

$$q = k * p_{\text{eje}} \quad (1.45)$$

De la Figura 3.15, se determina la pendiente entre la potencia y caudal de la bomba APMK32. En base a las características de la bomba, se calcula la constante  $k$  es igual a:

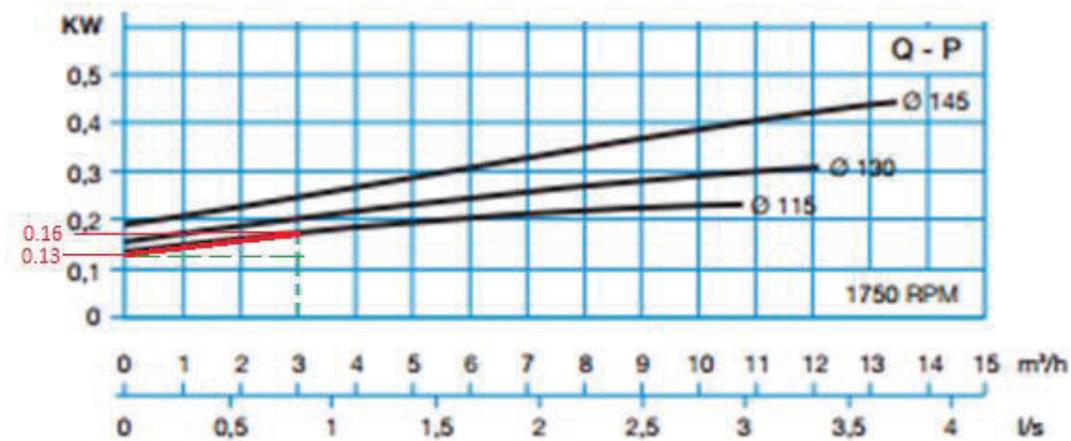
$$k = \frac{(3 - 0) \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right) * \left(\frac{1}{3600}\right) \left(\frac{\text{h}}{\text{s}}\right)}{(160 - 130)W} = 6.41 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{seg} * W}$$

Para efectos de cálculo durante la simulación el volumen quedará expresado en centímetros cúbicos.

$$k = 6.4 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg} * W}$$

Y queda la función de transferencia de la bomba de la siguiente manera.

$$G_b(s) = \frac{Q(s)}{p(s)} = k = 6.4$$



**Figura 3.15** Curva Característica de la Bomba AP - Caudal vs Potencia (BOMBASIDEAL, 2017)

### 3.4.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA VÁLVULA DE CONTROL

La función de la válvula es alterar el valor de la variable regulada en respuesta a la señal de salida. Cada elemento de control final (válvula) posee sus propias características de retardo dinámico o constantes de tiempo. Cuando se instala una válvula de control, se toma en cuenta dos aspectos: el activador, el cuál cambia la posición de giro de la válvula y la velocidad con la que actúa cuando se suministra energía eléctrica. La relación entre el flujo y la presión para una válvula lineal puede por lo general representarse mediante una función de transferencia  $G_v(s)$  de primer orden. (FTHEMES, 2011)

$$G_v(s) = \frac{Q(s)}{U(s)} = \frac{K_v}{\tau_v s + 1} \quad (1.46)$$

Donde:

- $Q(s)$ : Variable Manipulada.
- $U(s)$ : Señal proveniente del controlador (presión o mA).
- $K_v$ : Constante de la válvula (ganancia del estado estacionario).
- $\tau_v$ : Constante de tiempo de la válvula.

Mediante la válvula seleccionada, se halla el valor  $K_v$  mediante la siguiente ecuación:(RODRÍGUEZ, 2013)

$$K_v = \frac{\text{Caudal}}{\text{Recorrido en grados de la válvula}} = \frac{\text{Caudal}}{95^\circ} \quad (1.47)$$

Para calcular el caudal que entra a la válvula, se lo puede realizar mediante la Ecuación 1.36 y ser visualizado en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5** Valores  $K_v$  en función de la Potencia del Radiador

| Potencia (kW) | Caudal $Q(\text{cm}^3/\text{s})$ | $K_v$ |
|---------------|----------------------------------|-------|
| 1.1           | 21.9                             | 0.23  |
| 1.32          | 26.3                             | 0.28  |
| 4.4           | 87.7                             | 0.92  |
| 5.28          | 105.3                            | 1.11  |

Donde:

$$P1 = 1.1 \text{ Kw} = 1 \frac{\text{Kg}}{\text{l}} * Q * 4.180 \frac{\text{Kw}}{\text{s} * \text{Kg}^\circ\text{C}} * 12^\circ\text{C} \rightarrow Q = 0.0219 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 21.9 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

$$P2 = 1.32 \text{ Kw} = 1 \frac{\text{Kg}}{\text{l}} * Q * 4.180 \frac{\text{Kw}}{\text{s} * \text{Kg}^\circ\text{C}} * 12^\circ\text{C} \rightarrow Q = 0.0263 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 26.3 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

$$P_{eq1} = 4.4 \text{ Kw} = 1 \frac{\text{Kg}}{\text{l}} * Q * 4.180 \frac{\text{Kw}}{\text{s} * \text{Kg}^\circ\text{C}} * 12^\circ\text{C} \rightarrow Q = 0.0877 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 87.7 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

$$P_{eq2} = 5.28 \text{ Kw} = 1 \frac{\text{Kg}}{\text{l}} * Q * 4.180 \frac{\text{Kw}}{\text{s} * \text{Kg}^\circ\text{C}} * 12^\circ\text{C} \rightarrow Q = 0.1053 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 105.3 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

La constante de tiempo por lo general es pequeña comparado con otros componentes del sistema de control, para efectos de simulación se asume una constante de tiempo del radiador  $\tau_v = 4\text{s}$ .

### 3.4.3 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SENSOR DE TEMPERATURA

Se utiliza un sensor de temperatura para reportar el valor de la variable medida para compararlo con el valor deseado y lograr determinar el error del proceso. Como la respuesta del sensor es lineal, la función de transferencia se ve reflejada en la Ecuación 1.48. (ALLDATASHEET, 2016; RODRÍGUEZ, 2013)

$$G_s(s) = \frac{V(s)}{T(s)} = \frac{\text{Voltaje}}{\text{Temperatura}} = \frac{6V}{57^{\circ}\text{C}} = K_s \quad (1.48)$$

$$G_s(s) = \frac{6}{57} \left( \frac{V}{^{\circ}\text{C}} \right) = 0.11 \left( \frac{V}{^{\circ}\text{C}} \right)$$

### 3.4.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Para el cálculo de la función de transferencia del radiador de la Figura 3.3, se parte del concepto de energías en el sistema, visto en las Ecuaciones 1.49 y 1.50. (PAREDES, Adrián; BARROS, César; PLAZA, Douglas, 2015)

$$\text{Energía de entrada} - \text{Energía de Salida} = E_{in} - E_{out} = \frac{1}{2} m C_p \frac{dt_s(t)}{dt} \quad (1.49)$$

$$q(t)C_p t_{in} - q(t)C_p t_s(t) = \frac{1}{2} m C_p \frac{dt_s(t)}{dt} \quad (1.50)$$

Para linealizar se aplica la transformada de Laplace, quedando lo siguiente:

$$q(t)C_p t_s(t) = Q_o C_p t_{so} + C_p t_{so} (q(t) - Q_o) + Q_o C_p (t_s(t) - 0) \quad (1.51)$$

$$q(t)C_p t_s(t) = Q_o C_p t_{so} + C_p t_{so} q(t) - Q_o C_p t_{so} + Q_o C_p t_s(t)$$

$$q(t)C_p t_s(t) = C_p t_{so} q(t) + Q_o C_p t_s(t) \quad (1.52)$$

Y reemplazando en la Ecuación 1.49, queda:

$$q(t)C_p t_{in} - C_p t_{so} q(t) - Q_o C_p t_s(t) = \frac{1}{2} m C_p t_s(t) \quad (1.53)$$

Aplicando Laplace:

$$\Delta Q(s)C_P t_{in} - C_P t_{so} \Delta Q(s) - Q_o C_P \Delta t_s(s) = \frac{1}{2} m C_P s \Delta t_s(s) \quad (1.54)$$

$$\Delta Q(s)[C_P t_{in} - C_P t_{so}] = \Delta t_s(s) \left[ \frac{1}{2} m C_P s + Q_o C_P \right]$$

$$G_r(s) = \frac{\Delta t_s(s)}{\Delta Q(s)} = \frac{\frac{t_{in} - t_{so}}{Q_o}}{\frac{0.5m}{Q_o} s + 1} \quad (1.55)$$

Donde:

- $t_{in}$ : “temperatura de entrada = 57 °C
- $t_{so}$ : “temperatura de salida = 45 °C
- $m$ : “masa en base a la cantidad de agua dentro del radiador en kg”
- $Q_o$ : “flujo de agua en  $\frac{cm^3}{s}$ ”

En el sistema internacional de unidades el caudal está determinado en ( $m^3/s$ ), pero para efectos de cálculo toda unidad de caudal quedará expresado en centímetros cúbicos por segundo. Para el cálculo de  $m$ , se realiza mediante las Ecuaciones 1.56 y 1.57. (PAREDES, Adrián; BARROS, César; PLAZA, Douglas, 2015)

$$m = \delta_{H_2O} \text{Volumen}_{\text{radiador}} = 1000 \left( \frac{kg}{m^3} \right) * \text{Volumen}_{\text{radiador}} \quad (1.56)$$

$$\text{Volumen}_{\text{radiador}} = \frac{\pi * \text{Largo} * \text{Diámetro tubo}^2 * \#\text{tubos}}{4} \quad (1.57)$$

Del radiador seleccionado, se procede a calcular el volumen respectivo para:

- El radiador de 1.1 kW.

$$\text{Volumen}_{\text{radiador } 1.1kW} = \frac{\pi * 57.5 * 2.54^2 * 10}{4} = 2913.5 \text{ cm}^3 = 0.00291 \text{ m}^3$$

$$m = 1000 \left( \frac{kg}{m^3} \right) * 0.00291 \text{ m}^3 = 2.913 \text{ kg}$$

- El radiador de 1.32 kW.

$$\text{Volumen}_{\text{radiador } 1.32 \text{ kW}} = \frac{\pi * 57.5 * 2.54^2 * 12}{4} = 3496.2 \text{ cm}^3 = 0.0034 \text{ m}^3$$

$$m = 1000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * 0.0034 \text{ m}^3 = 3.496 \text{ kg}$$

La función de transferencia queda de la siguiente forma:

- Con Potencia de 1.1 kW:

$$G_{r1}(s) = \frac{\frac{(57-45)}{21.9}}{\frac{0.5 * 2.913}{21.9} s + 1} = \frac{0.55}{0.067s + 1}$$

- Con Potencia de 1.32 kW:

$$G_{r2}(s) = \frac{\frac{(57-45)}{26.3}}{\frac{0.5 * 3.496}{26.3} s + 1} = \frac{0.46}{0.066s + 1}$$

- Con Potencia de 4.4 kW:

$$G_{r1eq}(s) = \frac{4 * \frac{(57-45)}{87.7}}{\frac{0.5 * 2.913}{87.7} s + 1} = \frac{0.55}{0.017s + 1}$$

- Con Potencia de 5.28 kW:

$$G_{r2eq}(s) = \frac{4 * \frac{(57-45)}{105.2}}{\frac{0.5 * 3.496}{105.2} s + 1} = \frac{0.46}{0.017s + 1}$$

### 3.4.5 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL CONTROLADOR

Existe varios tipos de controladores, entre los más comunes para aplicaciones en sistemas de control de procesos son los PID (proporcional – integral – derivativo). Se pueden aplicar algunas técnicas tales como: Ziegler & Nichols, Cohen & Coon, López et al, Kaya & Sheib y Sung et al, para determinar cada parámetro del controlador y cumplir las especificaciones en estado estable y transitorio del sistema en lazo cerrado. (OGATA K. , 1998).

Simulink de Matlab posee un bloque para la sintonización de PID, el cual consiste en analizar las funciones de transferencia del sistema ya sea o no lineal de

cualquier orden polinómico y sacar las constantes deseadas, visto en la Figura 3.16.

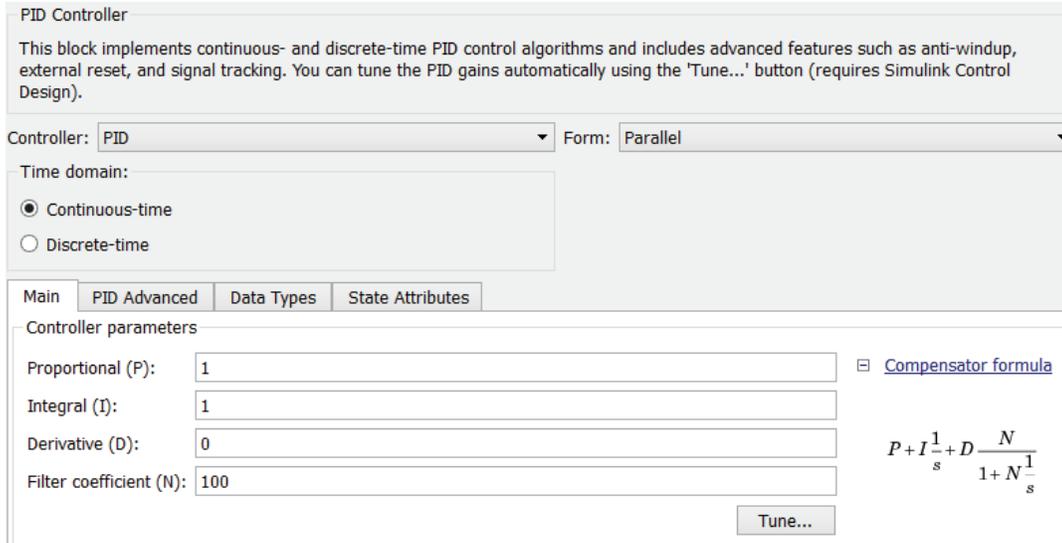
La salida del bloque PID se define a su salida como la suma de la parte proporcional P, integral I y acciones derivadas (P y D). Adicional, a las técnicas tradicionales PID, esta posee un coeficiente del filtro N que indica la ubicación del polo en el filtro de derivados, es decir, el polo del filtro cae en  $s = -N$ . Su función de transferencia se visualiza a continuación:(MATHWOKS, 2017)

$$G_{\text{controlador}} = \left[ P + I \left( \frac{1}{s} \right) + D \left( \frac{N * s}{s + N} \right) \right] \quad (1.58)$$

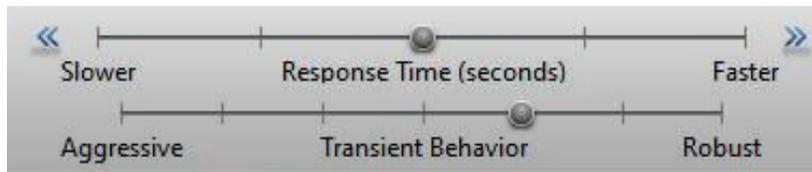
$$G_{\text{controlador}} = \left[ P + I \left( \frac{1}{s} \right) + D \left( \frac{N}{1 + \frac{N}{s}} \right) \right] \quad (1.59)$$

Mediante esta sintonización, el usuario puede ajustar los parámetros PID del controlador para obtener un diseño robusto en un tiempo de respuesta deseado; esto implica realizar las siguientes tareas:(MATHWOKS, 2017)

- Iniciar el Sintonizador PID “Tune”: cuando se realiza esta acción, Matlab calcula automáticamente las constantes P, I y D del modelo y diseña un controlador inicial.
- Ajuste del controlador en base al criterio de diseño del usuario, esto implica hacer variaciones del tiempo de respuesta y del sistema sea más robusto o agresivo (Figura 3.17); cada cambio de este tipo, influirá en las variaciones de a qué tiempo el sistema se estabiliza y que error o máximo sobreimpulso habrá en el sistema.



**Figura 3.16** Sintonización del controlador PID con Simulink (Dalgo y Loachamín)



**Figura 3.17** Ajuste del Sistema Robusto (Dalgo y Loachamín)

### 3.4.6 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SENSOR DE CAUDAL

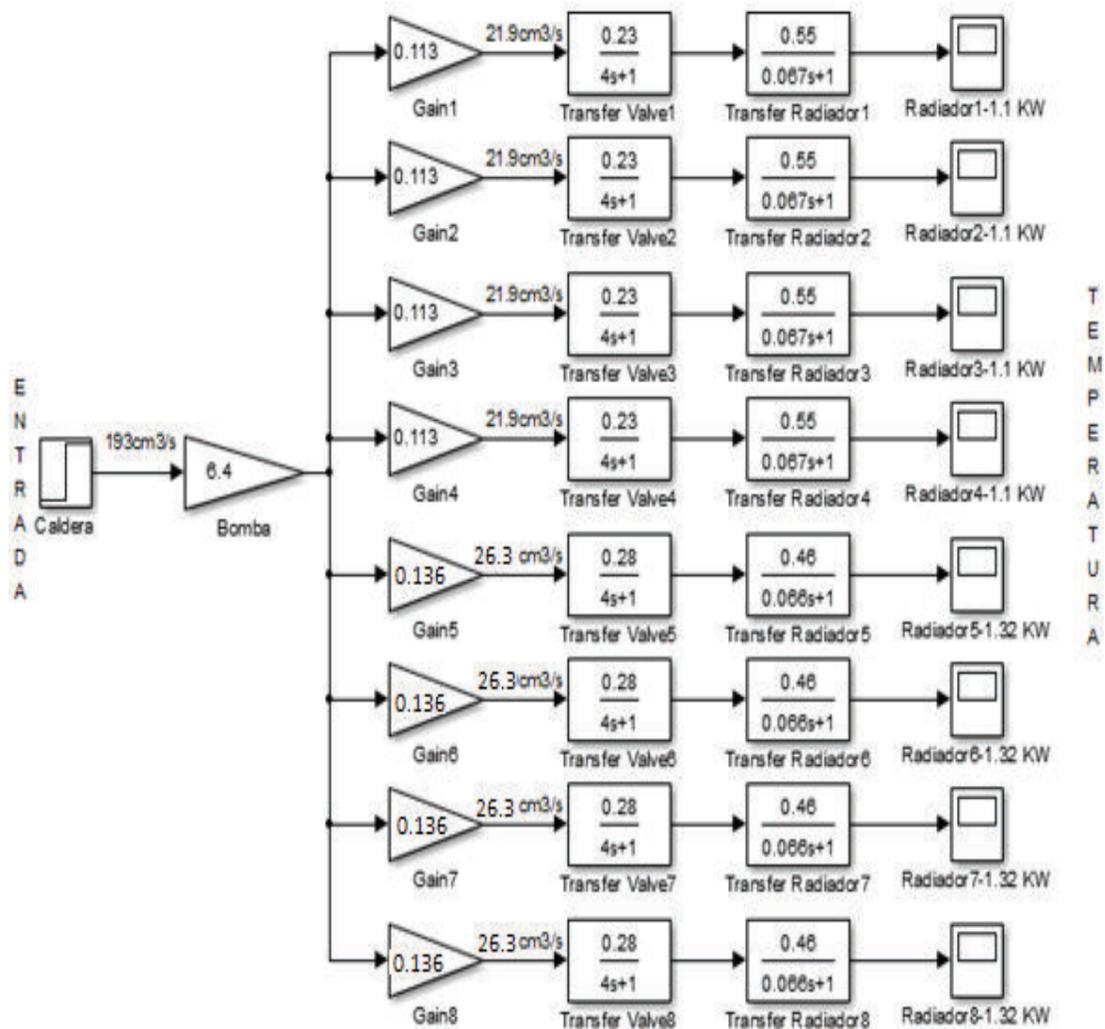
Se utiliza un sensor de caudal para reportar la variable medida (cantidad de agua circulante), dicho dato se compara con el valor deseado para determinar el error del proceso. La función de transferencia se ve reflejada en la Ecuación 1.60. (MARQUEZ, 2014; RODRÍGUEZ, 2013)

$$G_c(s) = \frac{V(s)}{\text{Caudal}(s)} = \frac{5 - 0}{(30 - 1) \left( \frac{1000}{60} \right)} \left( \frac{V}{\text{cm}^3/\text{s}} \right) = 0.01 \left( \frac{V * s}{\text{cm}^3} \right) = \mathcal{K}_c \quad (1.60)$$

### 3.5 ANÁLISIS Y RESULTADOS

El modelo de la planta es un sistema no lineal; debido a este detalle se tiene dos condiciones en los sistemas de control automático. Para las elaboraciones de diseño de la planta se realiza un análisis en lazo abierto y lazo cerrado. Dentro del proceso se tiene como entrada el caudal de flujo de agua que sale de la caldera y a la salida del proceso es la temperatura de calefacción al ambiente.

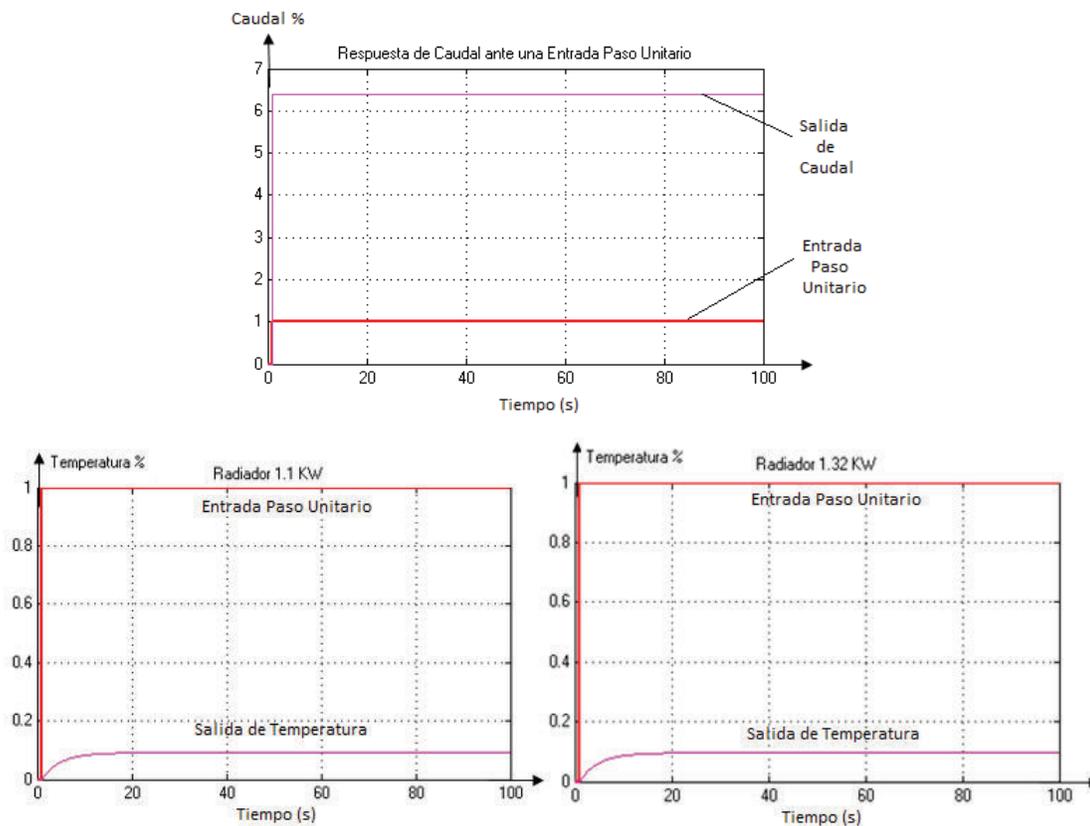
#### 3.5.1 RESULTADOS DEL SISTEMA DE CONTROL EN LAZO ABIERTO



**Figura 3.18** Sistema en Lazo Abierto para 8 Radiadores (Dalgo y Loachamín)

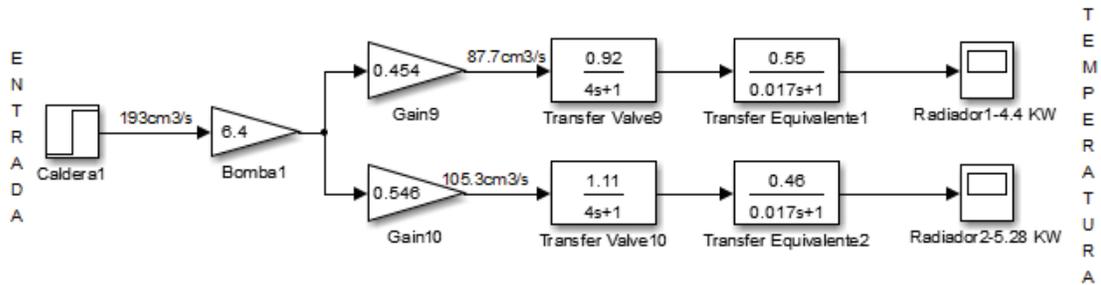
En la Figura 3.18, se visualiza lo siguiente:

- Una Entrada de señal Paso Unitario cuyo rango es de 0 a 1 que representa la salida de agua de la caldera, cuyo rango es de 0 a  $193 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ .
- Funciones de transferencia para una bomba de recirculación (6.4).
- El caudal se divide para los 8 canales de los radiadores (Gain 1 a la 8). Por lo que hay reducción de caudal para cada radiador, se tienen funciones de transferencia de 0.113 y 0.136.
- Funciones de transferencias para válvulas (Transfer Valve 1 a la 8).
- Se tiene 8 funciones de transferencia para radiadores, 4 con potencia de 1.1 KW y 4 de 1.32 KW.
- En las salidas se representa con un osciloscopio, con la finalidad de ver el comportamiento ante una entrada escalón (Figura 3.19).



**Figura 3.19** Respuesta de Caudal y Temperatura ante una señal paso unitario en Lazo Abierto para el radiador de 1.1 y 1.32 kW (Dalgo y Loachamín)

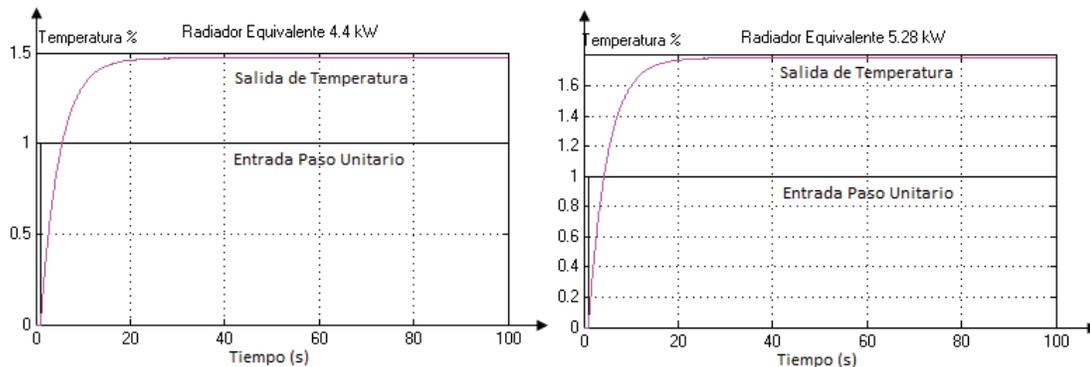
En la Figura 3.20, se realiza un análisis en base a radiadores equivalentes de 1.1 y 1.32 kW para simplificar el modelo del sistema estudiado.



**Figura 3.20** Sistema en Lazo Abierto para 2 Radiadores Equivalentes (Dalgo y Loachamín)

**Tabla 3.6** Respuesta de Salida en el Sistema de Lazo Abierto (Dalgo y Loachamín)

| 8 Radiadores              |               |
|---------------------------|---------------|
| P1=1.1 Kw                 | Salida=0.0867 |
| P2=1.32 Kw                | Salida=0.113  |
| 2 Radiadores Equivalentes |               |
| Peq1=4.4 Kw               | Salida=1.473  |
| Peq2=5.28 Kw              | Salida=1.79   |



**Figura 3.21** Respuesta de Temperatura ante una señal paso unitario en Lazo Abierto para el radiador equivalente de 4.4 y 5.28 kW (Dalgo y Loachamín)

Se analizará mediante la Tabla 3.6, si es viable o no, sacar funciones de transferencia equivalentes del proceso mediante el uso del error relativo.

- Para  $P1 = 1.1 \text{ kW}$  y  $Peq1 = 4.4 \text{ kW}$  se tiene lo siguiente:

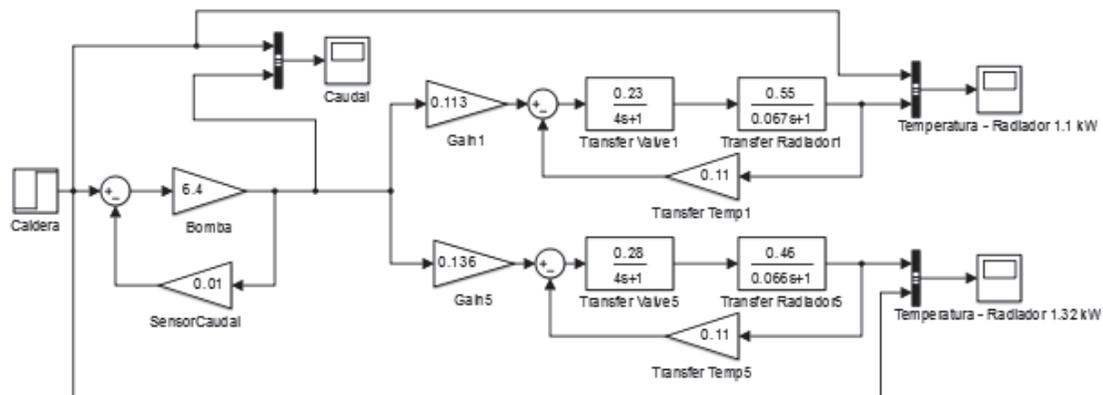
$$E_r \% = \left( \frac{0.0867 - \frac{1.473}{4}}{\frac{1.473}{4}} \right) * 100\% = -76.45 \% \quad (1.60)$$

- Para  $P2 = 1.32 \text{ kW}$  y  $Peq2 = 5.28 \text{ kW}$  se tiene lo siguiente:

$$E_r \% = \left( \frac{0.113 - \frac{1.79}{4}}{\frac{1.79}{4}} \right) * 100\% = -74.74 \% \quad (1.61)$$

Como puede verse en las Ecuaciones 1.60 y 1.61, los errores son elevados y pueden tomar medidas erróneas durante el proceso, por lo tanto, se concluye que no debe sacarse funciones equivalentes.

### 3.5.2 RESULTADOS DEL SISTEMA DE CONTROL EN LAZO CERRADO CON UNA BOMBA DE RECIRCULACIÓN

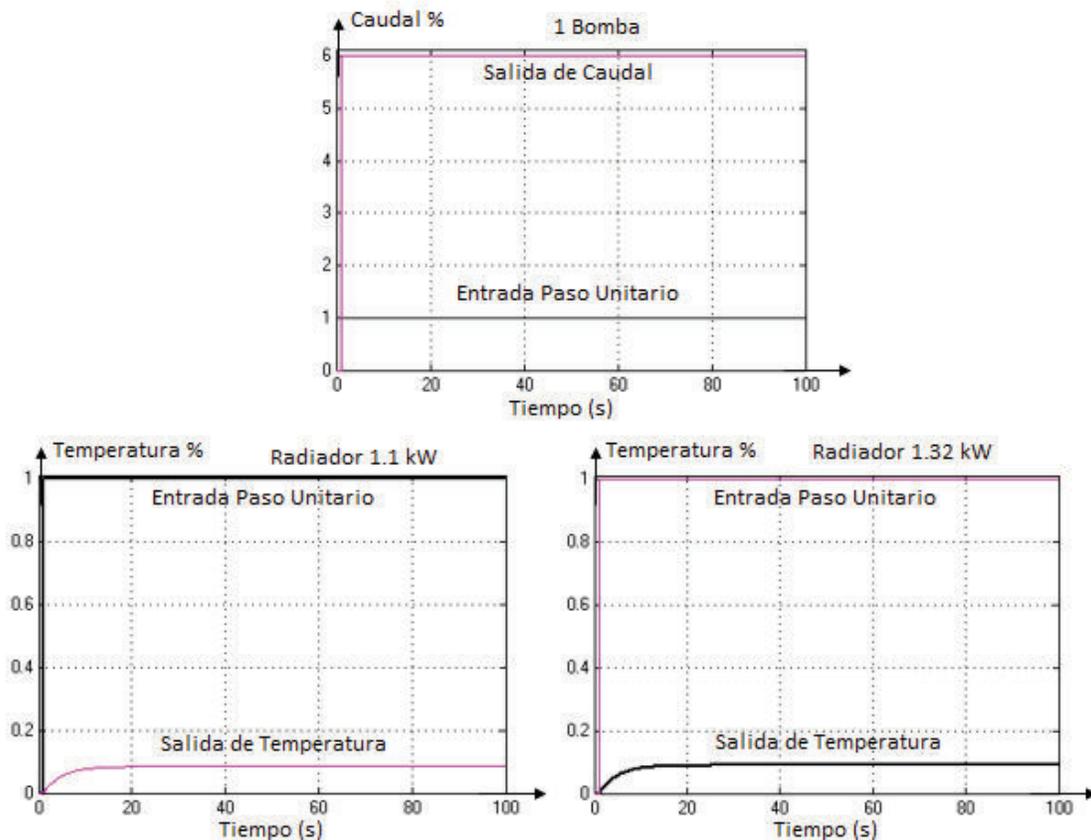


**Figura 3.22** Sistema en Lazo Cerrado para Radiadores (Dalgo y Loachamín)

**Tabla 3.7** Respuesta de Salida en el Sistema de Lazo Cerrado con una Bomba (Dalgo y Loachamín)

| 8 Radiadores |              |                           |              |
|--------------|--------------|---------------------------|--------------|
| P1=1.1 kW    | Salida=0.085 | 4.8 °C                    | 91.5% Error  |
| P2=1.32 kW   | Salida=0.106 | 6.0 °C                    | 89.4% Error  |
| Caudal       | Salida=6.02  | 1161.9 cm <sup>3</sup> /s | -502 % Error |

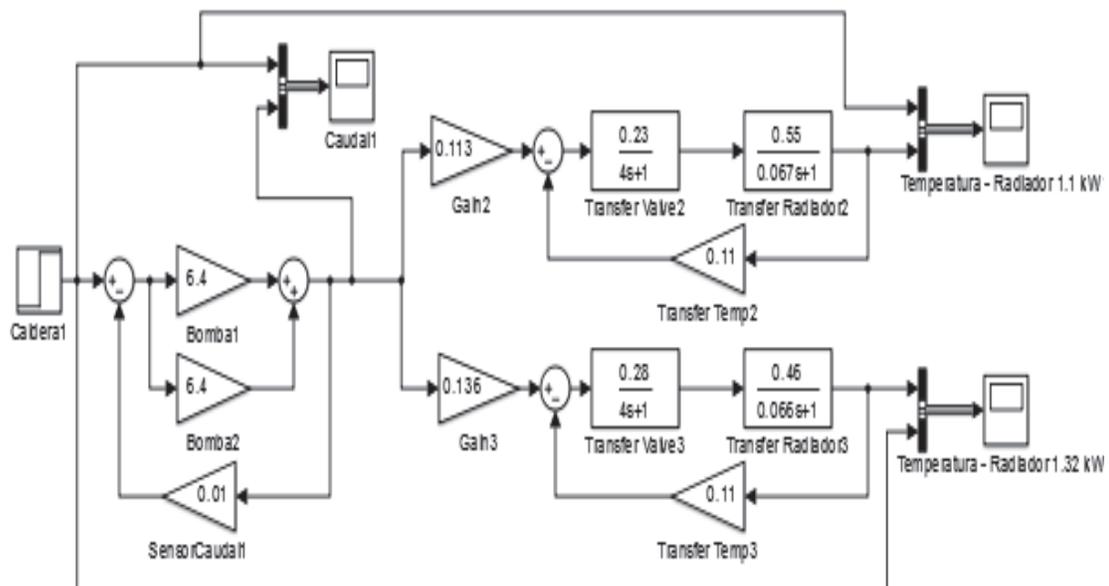
En las Figuras 3.22 y 3.23, se visualizan el proceso en Lazo Cerrado del sistema y sus respuestas ante una entrada escalón unitario. Se observa la señal de respuesta del caudal vs tiempo, que resulta ser similar ante la señal tipo Paso Unitario, con una menor amplitud de la unidad y con respecto a la señal de temperatura tiene un tiempo de retraso y sus amplitudes son muy pequeñas y vistas en la Tabla 3.7. A medida que las ganancias de la función de transferencia aumenten, su salida será mayor.



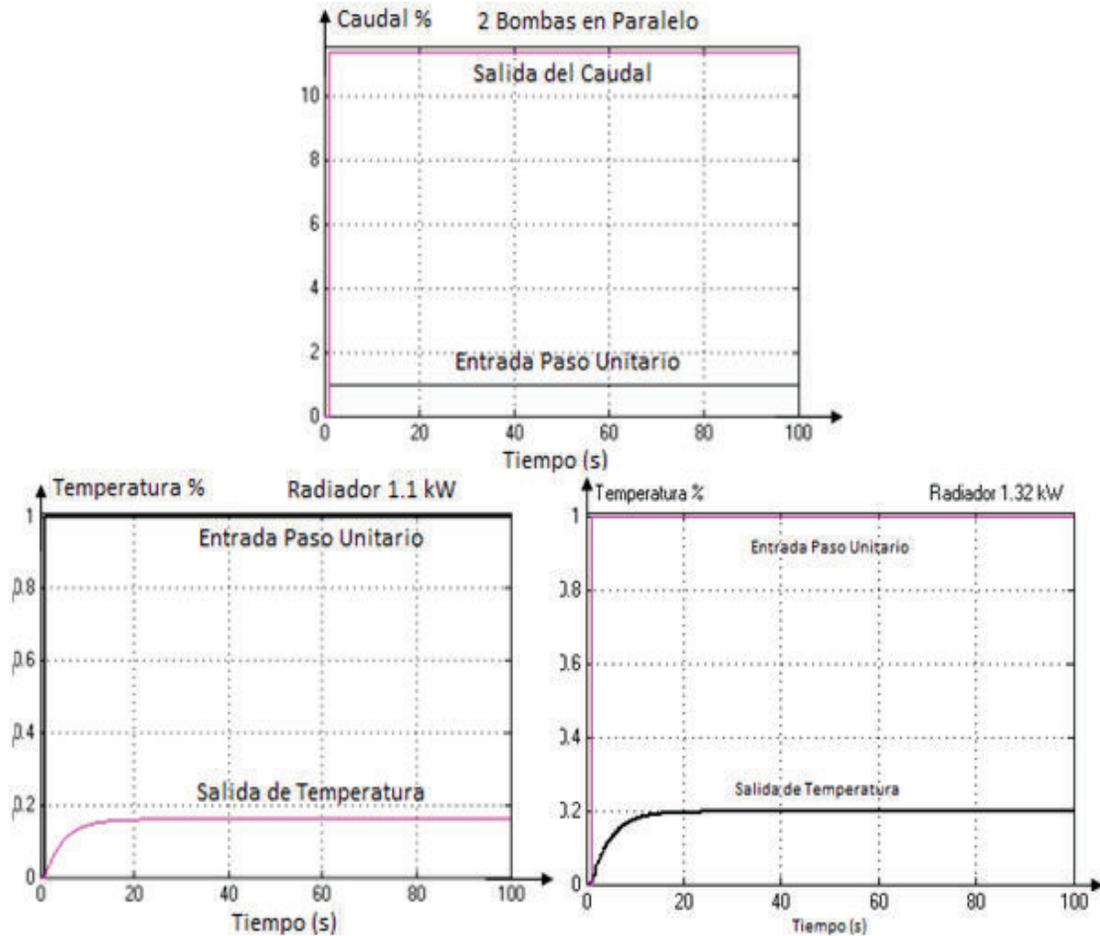
**Figura 3.23** Valor en estado estable del sistema con una bomba de recirculación para el radiador de 1.1 y 1.32 kW (Dalgo y Loachamín)

### 3.5.3 RESULTADOS DEL SISTEMA DE CONTROL EN LAZO CERRADO PARA BOMBAS EN PARALELO

En las Figuras 3.24 y 3.25 se visualiza la función del proceso en Lazo Cerrado del sistema y sus respuestas ante una entrada escalón. En la Tabla 3.8 indica que, al aumentar las bombas en conexión paralela, aumentará su señal de salida de respuesta a un aproximado de 2 veces su valor que el de una bomba de recirculación. La condición de cualquier señal es seguir a la señal de entrada, la cual es nuestro set-point o cursor, para el caso presente se debe asegurar un caudal y temperatura deseados, por lo que se implementan dos controladores respectivamente.



**Figura 3.24** Sistema en Lazo Cerrado para 8 Radiadores con 2 bombas (Dalgo y Loachamín)



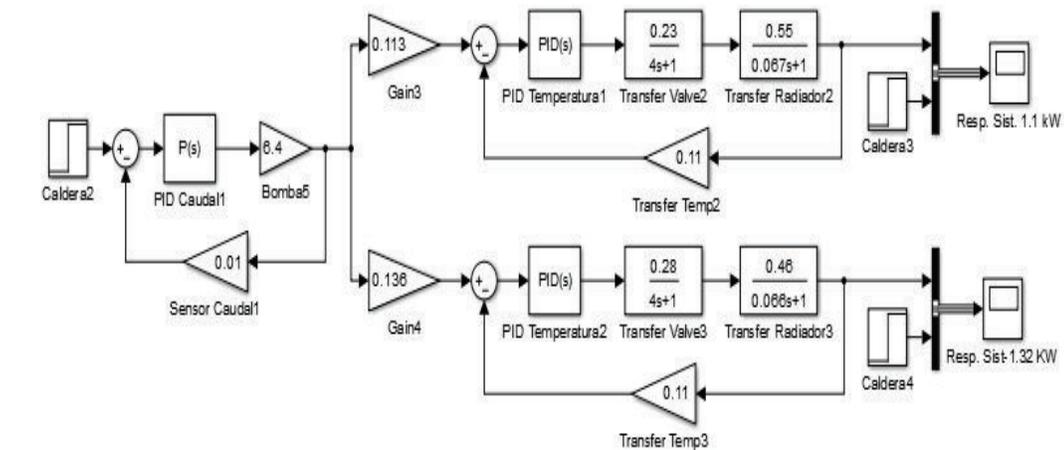
**Figura 3.25** Valor en estado estable del sistema con dos bombas de recirculación para el radiador de 1.1 y 1.32 kW (Dalgo y Loachamín)

**Tabla 3.8** Respuesta de Salida en el Sistema de Lazo Cerrado con 2 Bombas de Recirculación (Dalgo y Loachamín)

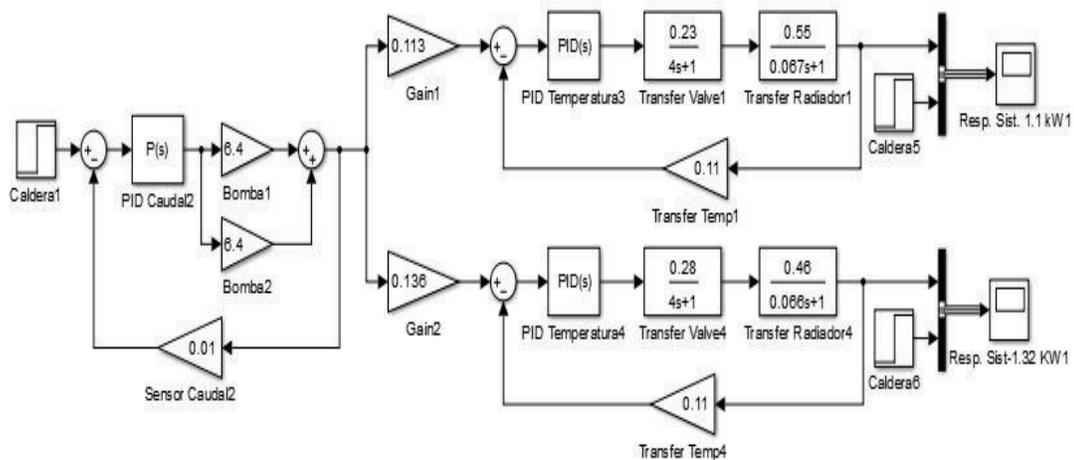
| 8 Radiadores |              |                           |              |
|--------------|--------------|---------------------------|--------------|
| P1=1.1 kW    | Salida=0.16  | 9.1 °C                    | 84% Error    |
| P2=1.32 kW   | Salida=0.20  | 11.4 °C                   | 80% Error    |
| Caudal       | Salida=11.36 | 2192.5 cm <sup>3</sup> /s | -1036% Error |

### 3.5.4 ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL CONTROLADOR CON EL SISTEMA DE LAZO CERRADO

En las siguientes Figuras y Tablas, se visualiza el funcionamiento del proceso en Lazo Cerrado del sistema con 1 y 2 bombas de recirculación y sus respuestas ante una entrada escalón unitario.



a) SISTEMA DE CALEFACCIÓN CON UNA BOMBA DE RECIRCULACIÓN



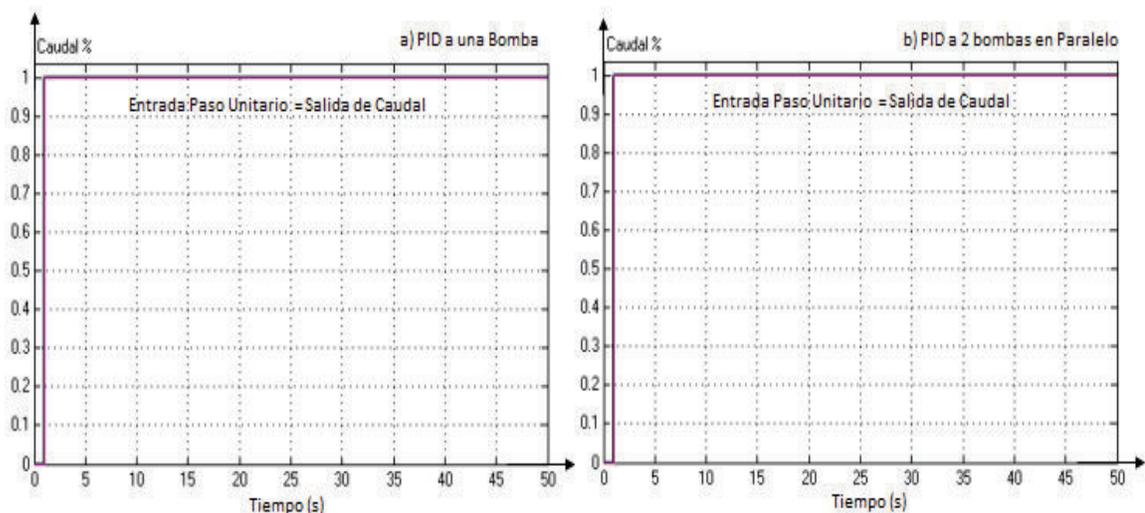
b) SISTEMA DE CALEFACCIÓN CON 2 BOMBAS DE RECIRCULACIÓN EN PARALELO

**Figura 3.26** Controladores PID para Caudal y Temperatura con 1 y 2 Bombas de Recirculación para radiadores de 1.1 y 1.32 KW (Dalgo y Loachamín)

**Tabla 3.9** Constante Proporcional para el control de caudal (Dalgo y Loachamín)

| Potencia kW   | Constante P | Descripción                | Error % |
|---|-------------|----------------------------|---------|
| <b>Controlador de Caudal con 1 Bomba de Recirculación</b> |             |                            |         |
| 1.1 y 1.32  | 0.158       | Ver <b>ANEXO 8</b>         | 0       |
|   | 15.625      | Sintonización Proporcional | 50      |
| <b>Controlador de Caudal con 2 Bomba de Recirculación</b> |             |                            |         |
| 1.1 y 1.32  | 0.079       | Ver <b>ANEXO 9</b>         | 0       |
|   | 7.8125      | Sintonización Proporcional | 50      |

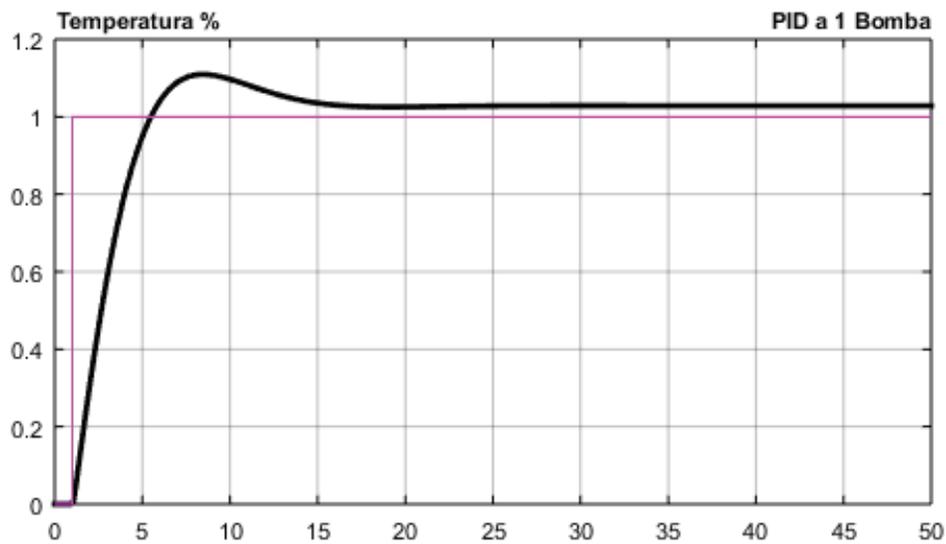
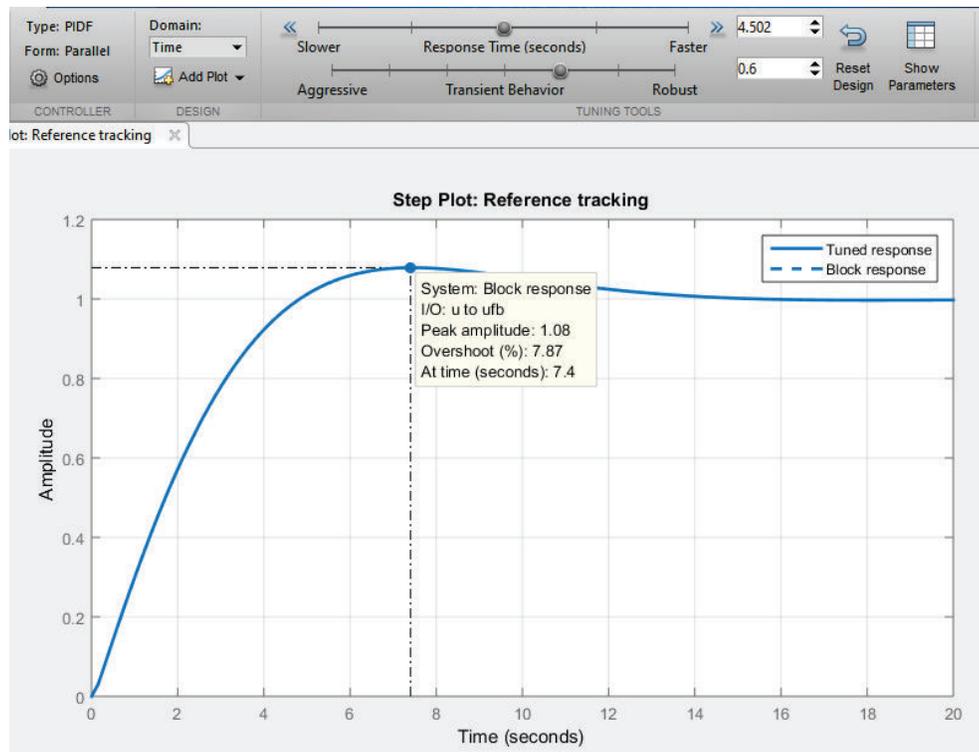
Como se visualiza en la Tabla 3.9, el bloque sintonización PID no funciona para funciones de transferencia que representa una constante, ya que eleva su constante proporcional en aproximadamente 100 veces su valor en comparación a los cálculos matemáticos realizados en los Anexos 8 y 9. La Figura 3.27 representa la salida de Caudal con las constantes proporcionales:  $P = 0.158$  y  $0.079$ , para 1 y 2 bombas respectivamente.



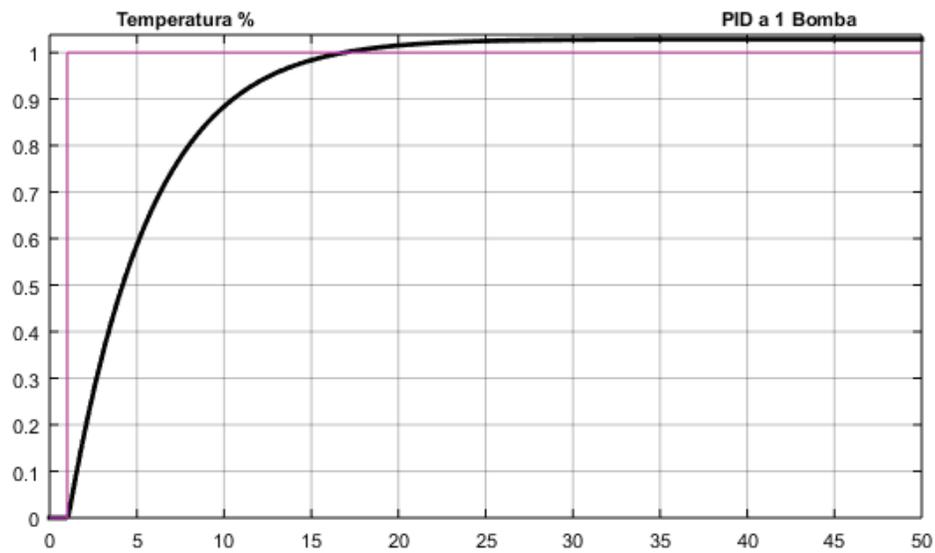
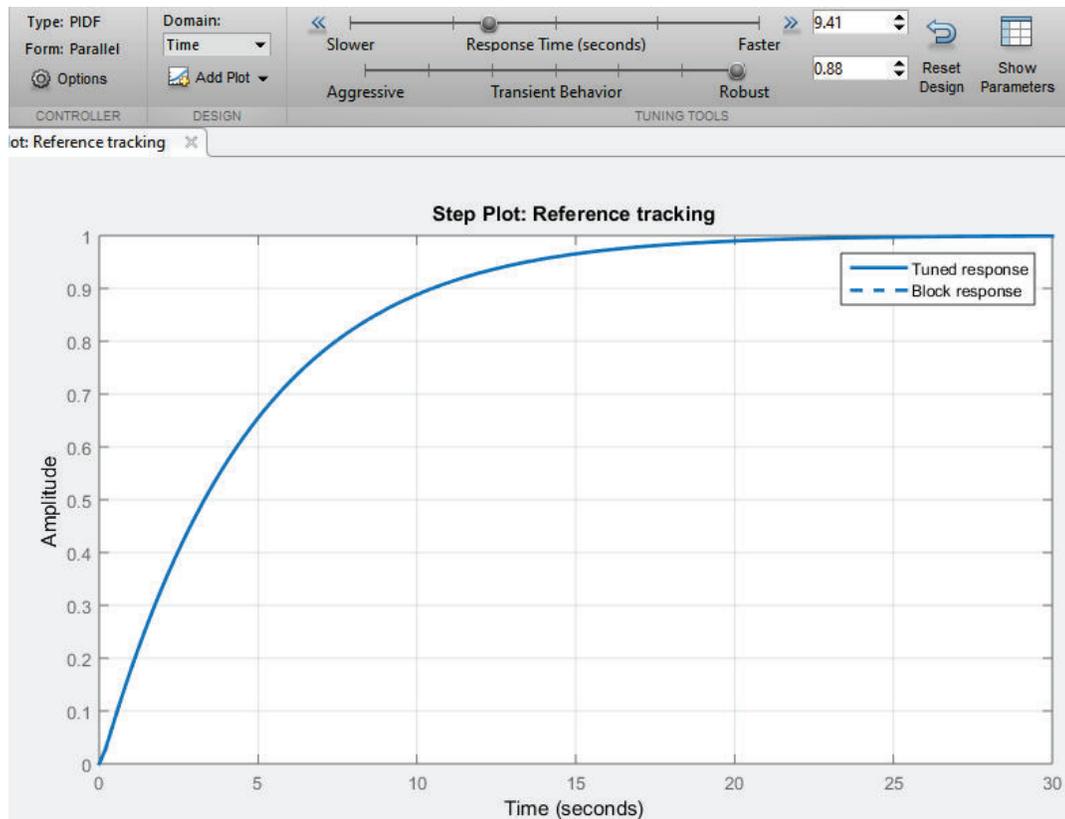
**Figura 3.27** Respuesta de Caudal con controlador proporcional (Dalgo y Loachamín)

**Tabla 3.10** Constantes PID para el control de temperatura (Dalgo y Loachamín)

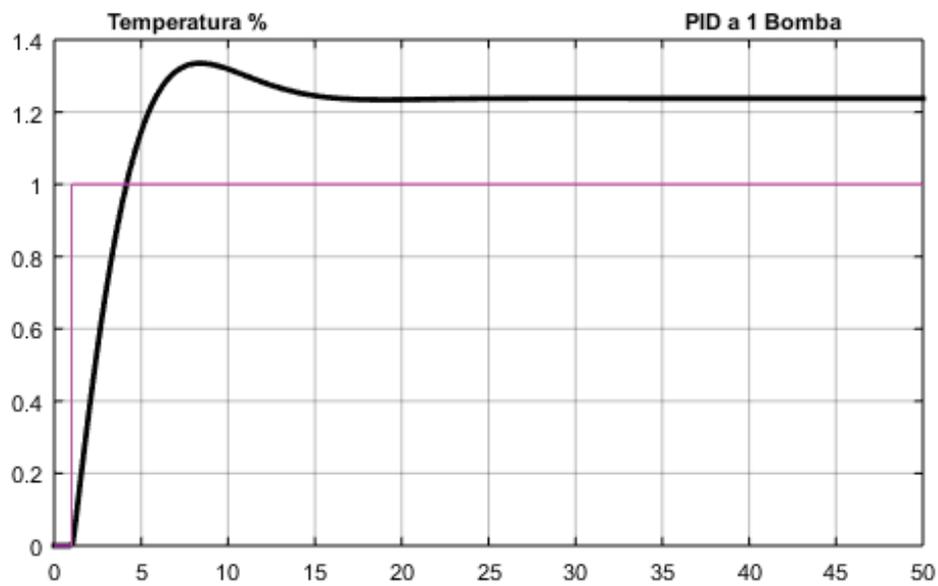
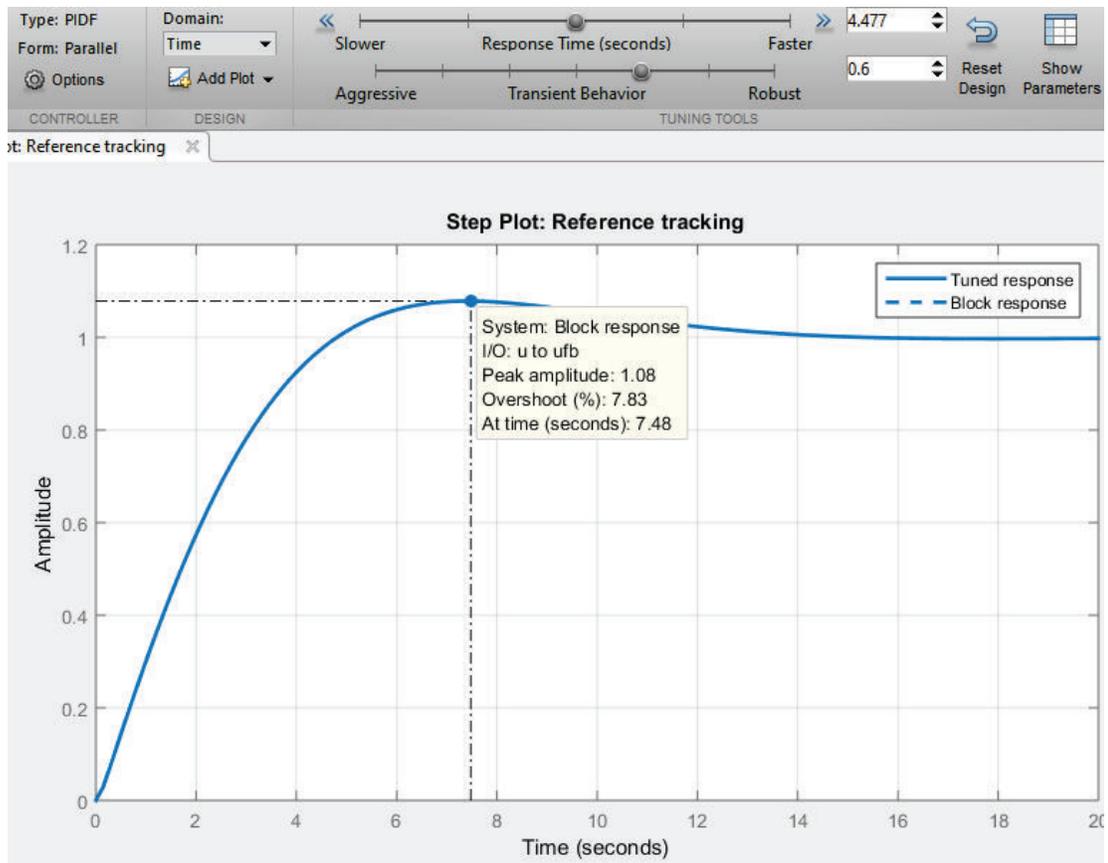
| Radiadores                             | Componentes del Controlador PIDn con la Sintonización |                       |                          |             |                         | Osciloscopio | Controlador y Salidas de Respuestas |
|--|---|-----------------------|--------------------------|-------------|-------------------------|--------------|-------------------------------------|
|  | Potencia kW   | Constantes P, I, D, N | Máximo Sobre - impulso % | Pico Máximo | Tiempo de Respuesta (s) |              |                                     |
| <b>Sintonización por Default (PID)</b> |   |                       |                          |             |                         |              |                                     |
| 1.1                                    | P= 98.19<br>I= 48.02<br>D= -6.62<br>N= 0.631          | 7.87                  | 1.08                     | 4.50        | 0.6                     | 2.8          | 3.28                                |
| 1.32                                   | P= 98.32<br>I= 47.25<br>D= -11.65<br>N= 0.44          | 7.83                  | 1.08                     | 4.47        | 0.6                     | 24.0         | 3.30                                |
| <b>Sintonización Modificada (PI)</b>   |   |                       |                          |             |                         |              |                                     |
| 1.1                                    | P= 59.60<br>I= 15.54<br>N= 100                        | 0                     | 1                        | 9.41        | 0.88                    | 3            | 3.29                                |
| 1.32                                   | P= 51.17<br>I= 13.41<br>N= 100                        | 0                     | 0.99                     | 10.7        | 0.88                    | 24.0         | 3.31                                |



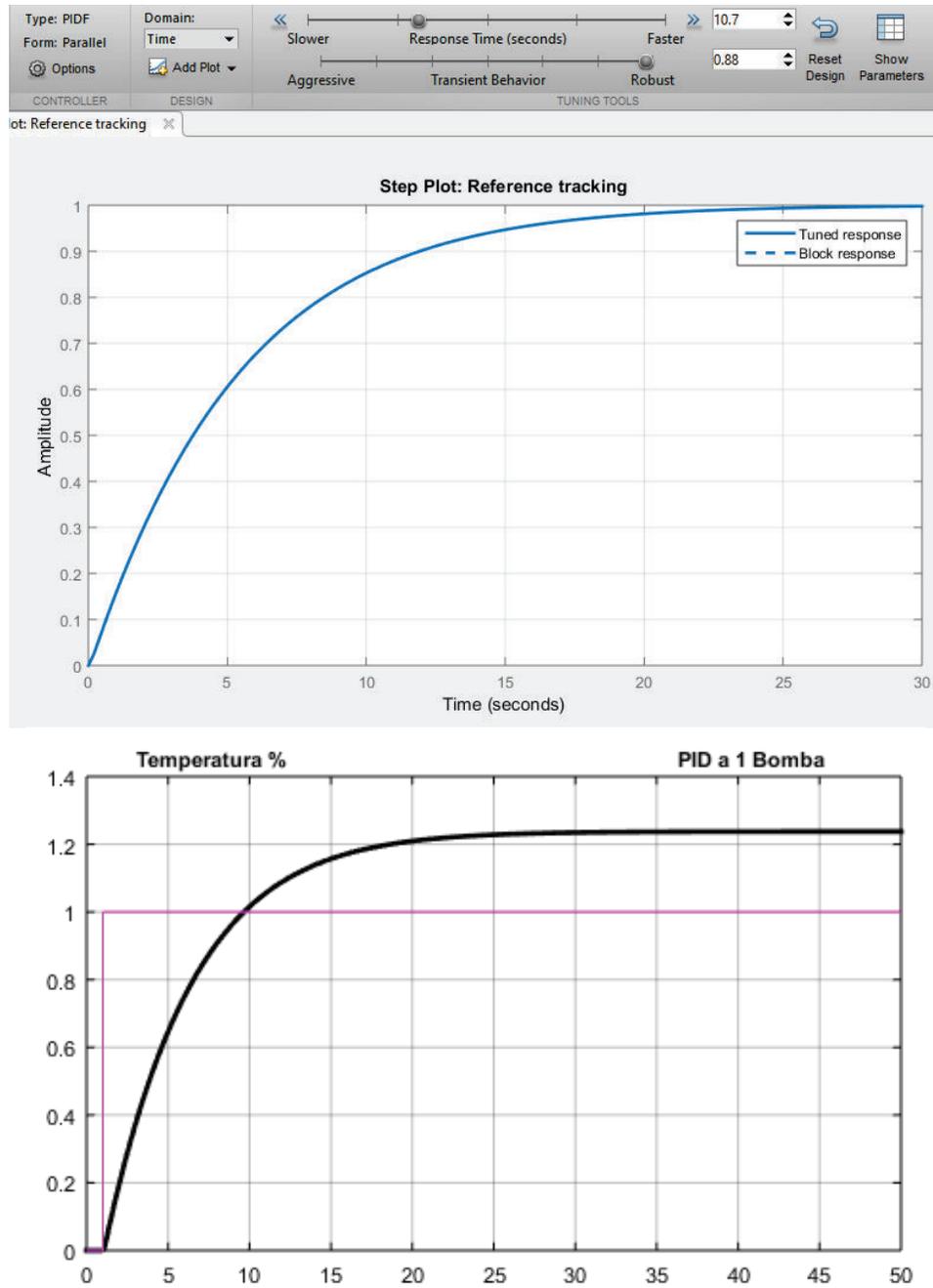
**Figura 3.28** Salida de Temperatura con Sintonización PID para un radiador de 1.1 kW (Dalgo y Loachamín)



**Figura 3.29** Salida de Temperatura con Sintonización PI para un radiador de 1.1 kW (Dalgo y Loachamín)



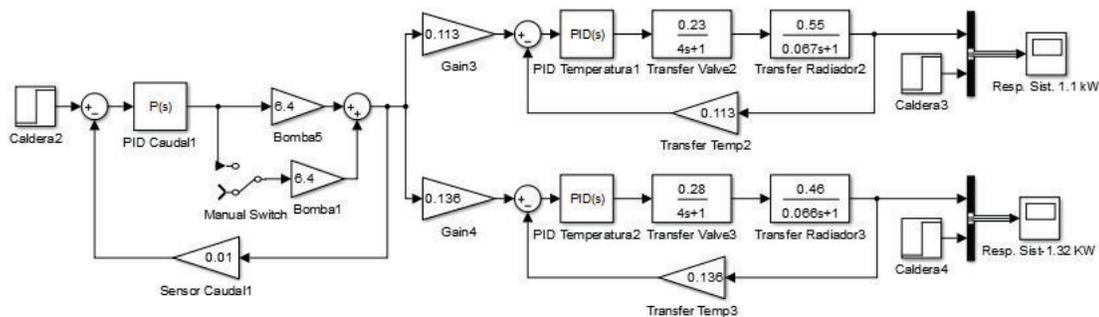
**Figura 3.30** Salida de Temperatura con Sintonización PID para un radiador de 1.32 kW (Dalgo y Loachamín)



**Figura 3.31** Salida de Temperatura con Sintonización PI para un radiador de 1.32 kW (Dalgo y Loachamín)

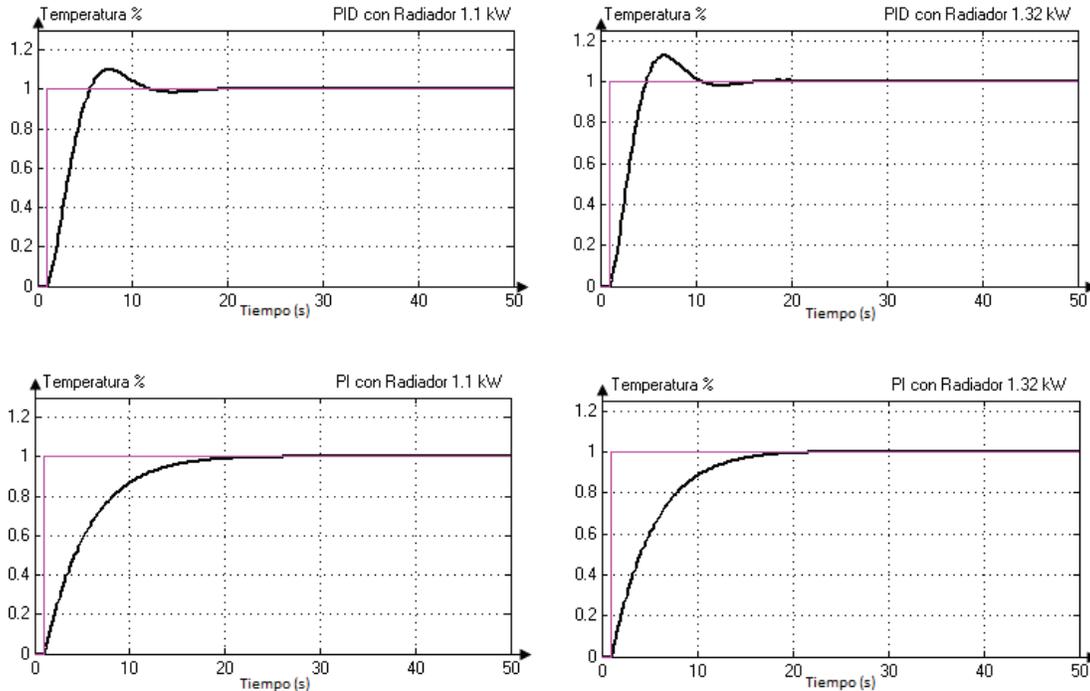
En base a las Figuras y Tablas anteriores, se ve lo siguiente:

- Cuando se utiliza bombas en paralelo la constante proporcional disminuye a la mitad para el control de caudal, debido a un aumento del mismo.
- La sintonización del bloque PID(s) ayuda a determinar las constantes P, I, D, N automáticamente sin la necesidad de utilizar otros métodos, tales como: ziegler nichols, compensadores en atraso, adelanto, atraso – adelanto, etc.
- Se puede realizar controladores PI o PIDn, con las siguientes condiciones de operación:
  - Si se utiliza un controlador PI, la función se estabiliza en un tiempo aproximado de 33 segundos. Si es para el controlador PID, como utiliza el parámetro derivativo, baja su tiempo de estabilización a 20 segundos.
  - En algunos casos bajará el error en estado estable, ya sea utilizando el controlador PI o PIDn, tal como se visualiza en la Tabla 3.10.
- Para determinar el comportamiento del sistema (Reducción de Caudal – Válvula – Radiador y Sensor de Temperatura) se desarrolla matemáticamente el lazo cerrado, visto en el Anexo 10.
- Para el caso del radiador de 1.32 kW posee errores altos en la salida del sistema, se debe disminuir el error en estable con respecto a lo indicado en la Tabla 3.10; para estos casos se debe realizar pruebas adicionales sobre el lazo de realimentación de temperatura, es decir, el producto de sus bloques del lazo de realimentación debe ser igual a la unidad, para lo cual la siguiente función de transferencia para el bloque de temperatura queda expresada de la siguiente forma (Figuras 3.32).



**Figura 3.32** Modificación en la función de transferencia del sensor de temperatura (Dalgo y Loachamín)

Utilizando las mismas variables proporcional P, integral I, derivativo D y coeficiente del filtro N de la Tabla 3.10, se visualizan a continuación, las salidas de temperatura para los controladores PI y PID.



**Figura 3.33** Salida de Temperatura con Sintonización PI y PID para los radiadores (Dalgo y Lochamín)

En base a los resultados generados en la Figura 3.33 y utilizando la Ecuación 1.48, se establece los valores de voltaje de salida del sensor de temperatura para los radiadores de 1.1 y 1.32 kW.

- Para el radiador 1.1 kW se tiene:

$$\text{Voltaje} = \text{Temperatura} * K_s = 57^{\circ}\text{C} * 0.113 \left( \frac{\text{V}}{^{\circ}\text{C}} \right) = 6.44 \text{ V}$$

- Para el radiador 1.32 kW se tiene:

$$\text{Voltaje} = \text{Temperatura} * K_s = 57^{\circ}\text{C} * 0.136 \left( \frac{\text{V}}{^{\circ}\text{C}} \right) = 7.75 \text{ V}$$

### 3.5.5 RESUMEN DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA

Se ha establecido una metodología general, para determinar la selección del proceso y sus funciones de transferencia.

- **Paso 1.** Procesos para realizar la selección

Se procede a identificar los componentes (número de variables a medir tanto como los instrumentos de medición) y la complejidad dependiendo del modelo de la planta o proceso a simular ya sea o no un sistema lineal. Se escoge como ejemplos: sistema de recirculación de una caldera, sistema de agua caliente sanitaria y sistema de calefacción para 8 radiadores, éstas son llevadas al proceso de selección. De las cuáles se identificarán componentes, tales como flujo, temperatura e instrumentos como sensores, actuadores y controladores; todos estos puntos son considerados para formar el sistema de control automático en lazo cerrado.

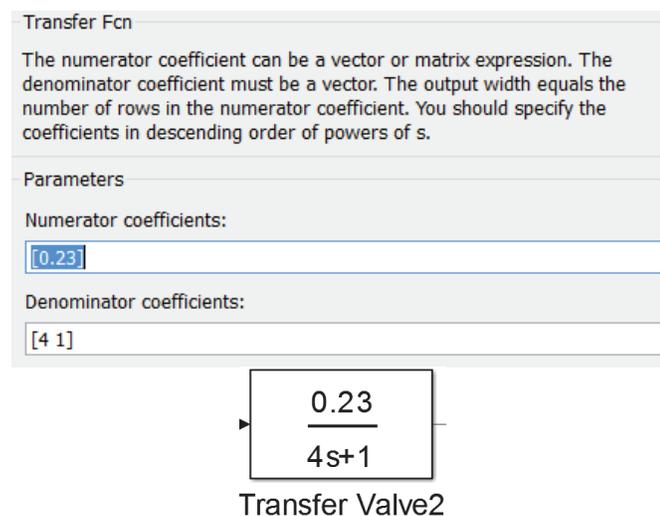
- **Paso 2.** Para la identificación de elementos del proceso, se procede a realizar los siguientes pasos:

- Diseño de cada uno de los componentes, para esto se establece las condiciones eléctricas, mecánicas y ambientales.
- Para efectos de simulación, se escoge dispositivos existentes en el mercado de la caldera, bomba de recirculación, sensores de caudal y temperatura, válvulas de tres vías y radiadores acorde a las características requeridas como caudal y temperatura, visto en los apartados “3.3 Selección de los Componentes y 3.4 Funciones de Transferencia del Sistema de Calefacción”.
- Del proceso a estudiar, se analizará la carga total instalada, sensores, actuadores, controladores y la planta.

- **Paso 3.** Función de Transferencia del Sistema.

Cada función de transferencia va asociada a las condiciones eléctricas, mecánicas y ambientales necesarias en el sistema. Como ejemplo, se toma como referencia, lo visto en el apartado 3.4. Función de Transferencia para el Sistema de Calefacción.

- En la bomba de recirculación, los parámetros de la función de transferencia dependen del flujo y potencia, visto en la ecuación 1.45.
  - Los parámetros de la función de transferencia de las válvulas de 3 vías, depende del caudal entrante y el ángulo de apertura de la misma, visto en las ecuaciones 1.46 y 1.47.
  - Los parámetros de las funciones de transferencia del sensor de temperatura y caudal, dependen del voltaje de salida y de la temperatura máxima a medir, visto en las ecuaciones 1.48 y 1.60. Se utiliza control de caudal para que la bomba ajuste el nivel de agua en cada uno de los radiadores y control de temperatura para mejorar el hábitat de las personas.
  - Los parámetros de la función de transferencia del radiador, dependen de las temperaturas mínima y máxima, del flujo circulante y volumen del radiador, visto en la ecuación 1.55.
- **Paso 4.** Ingreso de funciones en el Software de Simulación.
    - Se escoge el programa con el objetivo de simular el proceso, a través de las funciones de transferencia.
    - Cuando la función de transferencia es una constante, se lo representa mediante un amplificador. Si la función de transferencia es de primer orden en adelante, se ingresan los coeficientes del numerador y denominador, visto en la Figura 3.34.



**Figura 3.34** Ingreso de la Función de Transferencia (Dalgo y Loachamín)

- **Paso 5.** Simulación del Sistema en Lazo Abierto.

El sistema de lazo abierto se utiliza para observar el comportamiento del proceso, visto en la Figura 3.18 y un sistema simplificado del mismo en la Figura 3.20. Se evalúan los errores porcentuales de cada caso; con el objetivo de ver si es factible o no, simplificar el modelo de la planta. Estos sistemas responden ante una entrada escalón unitario.

- **Paso 6.** Simulación del Sistema en Lazo Cerrado.

- Se escoge este tipo de sistema con el objetivo de tener realimentación, mediante el uso de elementos de medición: caudal y temperatura. La idea es reemplazar el uso de funciones manuales operadas por el usuario en la toma de datos y convertir a elementos que midan continuamente el proceso. Estas funciones de transferencia representan el lazo de realimentación.
- Luego se detecta el error y genera una acción de control. Se determinará las constantes P, I y D usando la sintonización PID del simulink de Matlab, visto en el apartado “3.4.5 Función de transferencia del controlador”, a fin de reducir errores del sistema.
- Esto ayudará a obtener una respuesta deseada frente a una señal de entrada tipo escalón unitario, es decir, mide la variación de salida y el controlador modifica esa señal para que se estabilice el sistema. Con el monitoreo por parte del usuario (Figura 3.17), se modifican las variables P, I, D y/o N de la sintonización PID, ya sea para trabajar con el controlador PID o PI.

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.2 CONCLUSIONES

- Se ha realizado un análisis global de la dinámica física que gobierna la operación de las bombas de recirculación, intercambiadores de calor, actuadores y controladores, con el uso de programas computacionales, en este caso Simulink de Matlab. Este programa es una herramienta útil para ver el comportamiento del proceso.
- Matlab permite realizar cualquier simulación mediante diagramas de bloques para obtener la función de transferencia de cualquier elemento del proceso a simular. Con el uso de osciloscopios, se podrá observar la señal de salida del sistema.
- Se han investigado tres modelos, de los cuales, mediante el uso de tablas ponderadas, se ha determinado el proceso a ser estudiado. En las simulaciones realizadas, se logra visualizar la operación de una y dos bombas conectadas en paralelo. Y gracias al aumento de caudal, se observa el aumento de la señal de salida, es decir, su error porcentual visto en las Tablas 3.8 disminuye con respecto a la Tabla 3.7.
- Existe una gran variedad de controladores, del cual se ha optado por los controladores PID, muy aplicados en procesos industriales. Dentro de este tipo de controladores, existe diferentes maneras de obtener su calibración; el método práctico se realiza con la sintonización que posee el simulink de Matlab, el cual dependerá de su señal de respuesta en lazo abierto y cerrado, incluso existen sistemas que vienen de fábrica con un controlador PID, con el propósito de estabilizar el sistema y minimizar el error en su operación.

### 4.3 RECOMENDACIONES

- Antes de realizar una implementación de algún proceso o planta, primero se debe analizar los parámetros de medición de las variables, es decir, que se va a medir y controlar; se basa en el análisis, modelación matemática y simulación del modelo, con el propósito de hacer una simulación del proceso que se acerque al modelo real.
- Con el objeto de tener las limitaciones existentes que pueda tener un proceso simple, se recomienda obtener sus funciones de transferencia directamente de la adquisición de datos.
- La simulación del proceso ayudará en la toma de decisiones si se desea implementar mediante equipos eléctricos, electrónicos y mecánicos al modelo simulado, para estudiar su comportamiento real ante perturbaciones reales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### BIBLIOGRAFÍA

- CREUS, A. (1998). *Instrumentación Industrial*. Barcelona: Alfaomega. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Sensor>
- CZEKAJ, D. (1988). *Aplicaciones de la ingeniería. Maquinaria hidráulica en embarcaciones pesqueras pequeñas*. Roma: FAO.
- DULHOSTE, J. (2012). *Teoría de Control*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes - Escuela de Ingeniería Mecánica.
- GARCÍA, R. (2008). *Guía práctica sobre instalaciones centralizadas de calefacción y ACS en edificios y viviendas*. Madrid: IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- GILES, R. V. (1994). *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*. Madrid: McGraw Hill.
- GOENKA, B. (2009). Control valves. *Business, Entertainment and emotions*.
- GRUNDFOS. (2013). *Manual de bombeo de aguas residuales*. Grundfos.
- HOUCQUE, D. (2005). *Introduction to Matlab for Engineering Students*. Northwestern University.
- IDAE. (2012). *Guía Técnica. Selección de equipos de transporte de fluidos*. Madrid: Instituto para la diversificación y ahorro de la energía de España.
- KUO, B. (1996). *Sistemas de control automático*. Mexico: Prentice Hall.
- MARTÍN, I., SALCEDO, R., & FONT, R. (2011). Tema 2, Impulsión de Fluidos. En I. MARTÍN, R. SALCEDO, & R. FONT, *Mecánica de fluidos*. (págs. pp 1-64). California: Creative Commons.
- MOTT, R. (2006). *Mecánica de fluidos, Sexta edición*. México: Pearson Educación.
- NISE, N. S. (2011). *Control System Engineering*. John Wiley & Sons.
- OGATA, K. (1987). *Dinámica de sistemas*. Minnesota: Prentice Hall.
- OGATA, K. (1998). *Ingeniería de control moderna*. Mexico: Prentice Hall.
- OLSON, I., & HALSEN, V. (2003). *Principios y aplicaciones del riego*. Barcelona: Reverté.

- RENEDO, C. (2015). *Instalaciones de A.C.S.* Cantabria: Universidad de Cantabria.
- TREVOR, W. (1987). *Historia de la tecnología.* Madrid: Siglo Veintiuno.
- UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO. (2011). *Ahorro de energía en sistemas de bombas centrífugas.* Barranquilla, Colombia.
- VALERA, J. P. (2005). *Apuntes de FÍSICA GENERAL.* México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- VIEJO, M., & ÁLVAREZ, J. (2004). *Bombas. Teoría, diseño y aplicaciones.* México: Limusa. Noriega editores.
- WILO. (2010). *Principios fundamentales de la tecnología de las bombas centrífugas.* Alacá de Henares: Wilo España.
- ZERQUERA, M., & SÁNCHEZ, J. (2010). *Operación óptima de bombas en paralelo empleando variadores de velocidad.* Guadalajara: Reunión Panamericana e Ibérica de Acústica.

## LITOGRAFÍA

- ACADEMIA. (2016). *Academia.edu.* Obtenido de [https://www.academia.edu/8014551/BOMBA\\_CENTR%C3%8DFUGA\\_DEFINICI%C3%93N\\_Las\\_Bombas\\_centric%C3%ADfugas\\_tambi%C3%A9n\\_llamadas\\_Rotodin%C3%A1micas](https://www.academia.edu/8014551/BOMBA_CENTR%C3%8DFUGA_DEFINICI%C3%93N_Las_Bombas_centric%C3%ADfugas_tambi%C3%A9n_llamadas_Rotodin%C3%A1micas)
- ALFARO, V. (Enero de 2003). *MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID QUE OPERAN COMO REGULADORES.* Obtenido de [http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/documentos/pub\\_inv/articulos/valfaro02B.pdf](http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/documentos/pub_inv/articulos/valfaro02B.pdf)
- ALLDATASHEET. (20 de Junio de 2016). *Electronic Component's Datasheet.* Obtenido de [http://www.alldatasheet.com/?gclid=CISk\\_qKgj84CFQEmhgodgUQILg](http://www.alldatasheet.com/?gclid=CISk_qKgj84CFQEmhgodgUQILg)
- ANSIPRO. (2012). *AnsiPro.* Obtenido de <http://epump-flo.com/reg/login.aspx?ReturnUrl=%2fpumpselection%2fstorefront.aspx%3fdirname%3dansipro&dirname=ansipro>
- ASSETS. (2010). *assets.mheducation.* Obtenido de Motores electricos: <http://assets.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448173104.pdf>
- ATECYR. (junio de 2010). *Guía técnica de agua caliente sanitaria central.* Obtenido de [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_08\\_Guia\\_tecnica\\_agua\\_caliente\\_sanitaria\\_central\\_906c75b2.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_08_Guia_tecnica_agua_caliente_sanitaria_central_906c75b2.pdf)

- BELIMO, A. (20 de Junio de 2016). *Documentación Técnica Válvulas de Control Caracterizado Electrónicas CCV*. Obtenido de [http://serprogas.cl/catalogos-01/Belimo\\_Catalogo.pdf](http://serprogas.cl/catalogos-01/Belimo_Catalogo.pdf)
- BOMBASIDEAL. (2017). *BOMBAS IDEAL*. Obtenido de Bombas APM: <http://www.bombasideal.com/bombas/bombas-horizontales/apm/>
- BOSCH. (2016). *Caldera mural de condensación GB142*. Obtenido de [www.bosch-climate.mx](http://www.bosch-climate.mx)
- ELECTROMECHANICAMM. (2016). *BOMBAS*. Obtenido de <http://www.electromecanicamm.com.ar/listado.php?idsc=335>
- FERNANDES, M., & GONZÁLEZ, G. (2014). *SERIDA*. Obtenido de El sistema de riego localizado: <http://www.serida.org/publicacionesdetalle.php?id=6003>
- FERROLI. (Junio de 2015). *EQUIPOS DE BIOMASA*. Obtenido de CALDERAS Y GENERADORES DE AIRE CALIENTE: [http://www.ferroli.es/tarifas/catalogo\\_biomasa\\_industrial\\_final200125015.pdf](http://www.ferroli.es/tarifas/catalogo_biomasa_industrial_final200125015.pdf)
- FONDITAL. (2016). *Fondital*. Obtenido de [http://www.fondital.com/es/es/master\\_b3](http://www.fondital.com/es/es/master_b3)
- FTHEMES. (2011). *Control de Procesos*. Obtenido de <http://plantscontrol.blogspot.com/>
- GE. (s.f.). Obtenido de [http://www.gewater.com/handbook/cooling\\_water\\_systems/ch\\_32\\_closed.jsp](http://www.gewater.com/handbook/cooling_water_systems/ch_32_closed.jsp)
- HIDALGO, A. (2015). *Technoindustria*. Obtenido de <https://technoindustria.wordpress.com/2015/11/13/interfases-singulares-de-una-bomba-parte-i-recirculacion-desde-la-impulsion-hasta-la-aspiracion/>
- HIDRASOFTWARE. (2012). *Software Hidra*. Obtenido de <http://www.hidrasoftware.com/tag/tuberia-de-impulsion/>
- HIDROSTAL. (10 de Junio de 2012). *Hidrostal*. Obtenido de Soluciones en Tecnología: [http://www.hidrostal.com.pe/images\\_proyectos/ejelibre2858.pdf](http://www.hidrostal.com.pe/images_proyectos/ejelibre2858.pdf)
- INTELSERVICE, S. (2016). *Caldegas*. Obtenido de [http://www.gasnaturalfenosa.com.co/servlet/ficheros/1297134729856/FICHAS\\_POR\\_GASODOMESTICO.pdf](http://www.gasnaturalfenosa.com.co/servlet/ficheros/1297134729856/FICHAS_POR_GASODOMESTICO.pdf)
- MARQUEZ, A. (Mayo de 2014). *HeTPro*. Obtenido de <http://hetpro-store.com/TUTORIALES/sensor-de-flujo/>
- MATHWOKS, I. (2017). *MathWorks*. Obtenido de PID Controller Tuning: <http://es.mathworks.com/>

- MITHOS. (20 de Junio de 2016). *Mithos Radiator*. Obtenido de <http://www.mithosradiator.es/sigma.html>
- MONCADA, L. (2011). *Control de procesos. BlogSpot*. Obtenido de [http://plantscontrol.blogspot.com/2012/02/6\\_13.html](http://plantscontrol.blogspot.com/2012/02/6_13.html)
- PAREDES, Adrián; BARROS, César; PLAZA, Douglas. (2015). *Modelamiento y simulación de un intercambiador de calor*. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/31067/Modelamiento%20y%20simulaci%C3%B3n%20de%20un%20intercambiador%20de%20calor.pdf?sequence=1>
- PLASTIGAMA. (2016). *Agua Potable*. Obtenido de <http://sitio.plastigama.com/productos/construccion/agua-potable.html>
- PRIAS, O. (2002). *Ahorro de energía en sistemas de bombas centrifugas*. Obtenido de <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/bombas.pdf>
- PUENTES, H. (2016). *Unidad de Emprendimiento Virtual*. Obtenido de <http://unidademprendimientovirtual.blogspot.com/2010/05/m-seleccion-del-producto-o-servicio.html>
- RI. (2014). *Reportero Industrial*. Obtenido de [https://issuu.com/repoindreporteroindustrial/docs/infograf\\_\\_a\\_reportero\\_](https://issuu.com/repoindreporteroindustrial/docs/infograf__a_reportero_)
- RODRÍGUEZ, L. A. (11 de Marzo de 2013). *MODELO DEL CONTROL DE NIVEL Y CAUDAL DE LÍQUIDO EN UN DEPÓSITO CILÍNDRICO USANDO LA HERRAMIENTA SIMULINK DE MATLAB*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4762998.pdf>
- ROINTE. (2016). *SYGMA*. Obtenido de Manual de Instrucción: <http://rointe.com/descargas/MANUAL-TECNICO-RADIADOR-SYGMA.pdf>
- SEVILLA, U. D. (2007). *OpenCourseWare*. Obtenido de Velocidades recomendables para el transporte: [http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%202.Conducciones%20forzadas/tutorial\\_29.htm](http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%202.Conducciones%20forzadas/tutorial_29.htm).
- SIMROCK, S. (2007). *CERN*. Obtenido de Control Theory: <https://cds.cern.ch/record/1100534>
- UNET. (2005). *FENÓMENOS DE TRANSPORTE*. Obtenido de TURBOMÁQUINAS: [http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F\\_DE\\_T-164.htm](http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F_DE_T-164.htm)
- UNIDAS, I. (11 de Marzo de 2015). *Bombas Hidráulicas*. Obtenido de [http://www.cinfer.com.mx/images/pdf/Bombas\\_IUSA.pdf](http://www.cinfer.com.mx/images/pdf/Bombas_IUSA.pdf)

- VALVEXPORT. (2014). *Protección de bombas multi-etapa con válvulas de recirculación*. Obtenido de <http://www.valvexport.com/proteccion-de-bombas-multietapa-con-recirculacion.html>
- VILDÓSOLA C, E. (2015). *Apoyo a la Industria Eléctrica y Electrónica - AIE*. Obtenido de [www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/actuadores.pdf](http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/actuadores.pdf)
- WEKKER, J. (Junio de 2004). *Ingeniería e Instalaciones Wekker & Asociados*. Obtenido de Sistemas de Bombeo: [http://aducarte.weebly.com/uploads/5/1/2/7/5127290/sistema\\_hidroneumatico.pdf](http://aducarte.weebly.com/uploads/5/1/2/7/5127290/sistema_hidroneumatico.pdf)
- XYLEM. (Noviembre de 2015). *Catálogo Tarifa 2016*. Obtenido de [http://www.xylemwatersolutions.com/scs/spain/es-es/Products/Bombas/bombas%20para%20agua%20limpia%20y%20calefaccion/Documents/Catalogo\\_tarifa\\_2016\\_%20low.pdf](http://www.xylemwatersolutions.com/scs/spain/es-es/Products/Bombas/bombas%20para%20agua%20limpia%20y%20calefaccion/Documents/Catalogo_tarifa_2016_%20low.pdf)
- ZERQUERA, M., & SÁNCHEZ, J. (2010). *Operación óptima de bombas en paralelo empleando variadores de velocidad*. Guadalajara: Reunión Panamericana e Ibérica de Acústica.

## **ANEXOS**

**ANEXO 1.** Caldera Mural de Condensación GB172 – Marca Bosch.

**ANEXO 2.** Bomba Centrífuga APMK32.

**ANEXO 3.** Válvula mezclador tres vías TR24-SR-T US.

**ANEXO 4.** Sensor de Temperatura LM35.

**ANEXO 5.** Sensor de Caudal YF-S201

**ANEXO 6.** Intercambiador de Calor SRN1100RAD y SRN1300RAD.

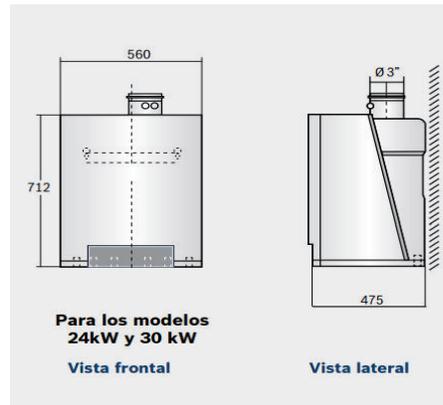
**ANEXO 7.** Tabla para selección de vasos de expansión para viviendas.

**ANEXO 8.** Análisis matemático para el controlador PID del sistema de lazo cerrado para una bomba de recirculación.

**ANEXO 9.** Análisis matemático para el controlador PID del sistema de lazo cerrado para dos bombas de recirculación en paralelo.

**ANEXO 10.** Comportamiento del sistema en lazo cerrado con respecto al sensor de temperatura.

## ANEXO 1. Caldera GB142.

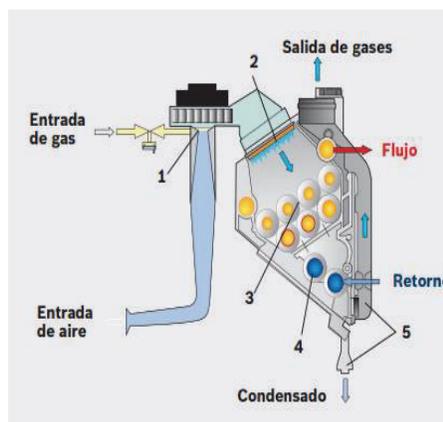


- **FUNCIONAMIENTO DE LA TECNOLOGÍA DE CONDENSACIÓN.**

1. Una mezcla perfecta de aire y gas entra en la caldera.
2. La flama pasa a través del intercambiador de calor.
3. El agua fría es calentada por los gases calientes.
4. Cuando los gases quemados salen, se condensan debido al cambio de temperatura.

El agua fría es precalentada antes de entrar al intercambiador de calor, incrementado así la eficiencia del sistema completo.

5. Los gases fríos salen por el ducto de ventilación.



## (Parte 2)

## Especificaciones Técnicas

| Modelo<br>Características                                      | GB142/24          | GB142/30          | GB142/45          | GB142/60          |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Ajuste de temperatura  | ✓                 | ✓                 | ✓                 | ✓                 |
| Diseño y fabricación   | Alemana           | Alemana           | Alemana           | Alemana           |
| Acabado exterior   | Blanco            | Blanco            | Blanco            | Blanco            |
| Tipos de gas   | Gas Natural o LP. |
| Garantía   | 2 años            | 2 años            | 2 años            | 2 años            |
| Operación extremadamente silenciosa                            | ✓                 | ✓                 | ✓                 | ✓                 |
| Certificado Energy Star  | ✓                 | ✓                 | ✓                 | ✓                 |
| <b>Seguridad</b>   |                   |                   |                   |                   |
| Sensor de superficie caliente                                  | ✓                 | ✓                 | ✓                 | ✓                 |
| Sensor autodiagnóstico de fallas                               | ✓                 | ✓                 | ✓                 | ✓                 |
| Sensor de temperaturas   | ✓                 | ✓                 | ✓                 | ✓                 |
| Sensor de presión de circuito                                  | ✓                 | ✓                 | ✓                 | ✓                 |
| <b>Información Técnica</b>                                     |                   |                   |                   |                   |
| Carga térmica nominal para Gas Natural (BTU/h)                 | 25700 - 84800     | 31800 - 106000    | 48100 - 160900    | 64400 - 198800    |
| Capacidad de calentamiento nominal para curva 80/60 °C (BTU/h) | 22700 - 75200     | 28100 - 91500     | 42500 - 14200     | 56800 - 176300    |
| Capacidad de calentamiento nominal para curva 50/30 °C (BTU/h) | 25300 - 83300     | 30700 - 102400    | 47200 - 158000    | 63200 - 196600    |
| Máxima eficiencia en curva de calefacción 80/60 °C (BTU/h)     | 88                | 88                | 88                | 88                |
| Máxima eficiencia en curva de calefacción 50/30 °C (BTU/h)     | 97                | 97                | 97                | 97                |
| Potencia (BTU/hr)  | 76300             | 95400             | 144800            | 178900            |
| Máxima temperatura del agua (°C)                               | 90                | 90                | 90                | 90                |
| Temperatura del agua en el calentador (°C)                     | 30 - 90           | 30 - 90           | 30 - 90           | 30 - 90           |
| Presión máxima de operación (bar)                              | 3                 | 3                 | 3                 | 3                 |
| Volumen de agua en el circuito (l)                             | 2,5               | 2,5               | 3,6               | 4,7               |
| Temperatura de gases 80/60 °C en carga plena (°C)              | 66                | 75                | 66                | 66                |
| Temperatura de gases 50/30 °C en carga plena (°C)              | 45                | 48                | 36                | 36                |
| Factor de emisión estándar CO (mg/kWh)                         | ≤15               | ≤15               | ≤15               | ≤15               |
| Factor de emisión estándar NOx (mg/kWh)                        | ≤20               | ≤20               | ≤20               | ≤20               |
| <b>Dimensión del producto</b>                                  |                   |                   |                   |                   |
| Ancho x Alto x Profundidad (mm)                                | 560 x 712 x 475   | 560 x 712 x 475   | 900 x 712 x 475   | 900 x 712 x 475   |
| Peso (kg)  | 50                | 50                | 65                | 72                |
| <b>Información eléctrica</b>                                   |                   |                   |                   |                   |
| Alimentación eléctrica (V-Hz)                                  | 120 - 60          | 120 - 60          | 120 - 60          | 120 - 60          |
| <b>Conexiones</b>  |                   |                   |                   |                   |
| Diámetro de conexión de gas (pulgadas/mm) NPT                  | 3/4 " / 19        | 3/4 " / 19        | 3/4 " / 19        | 3/4 " / 19        |
| Diámetro de conexión sistema de calefacción (pulgadas/mm) NPT  | 1" / 25           | 1" / 25           | 1" / 25           | 1" / 25           |
| Diámetro de conexión agua de condensación (pulgadas/mm) ø      | 1,3" / ø 32       |
| Diámetro de chimenea (pulgadas/mm)                             | 3" / 80           | 3" / 80           | 3" / 80           | 3" / 80           |

## ANEXO 2. Bomba Centrífuga APMK32.

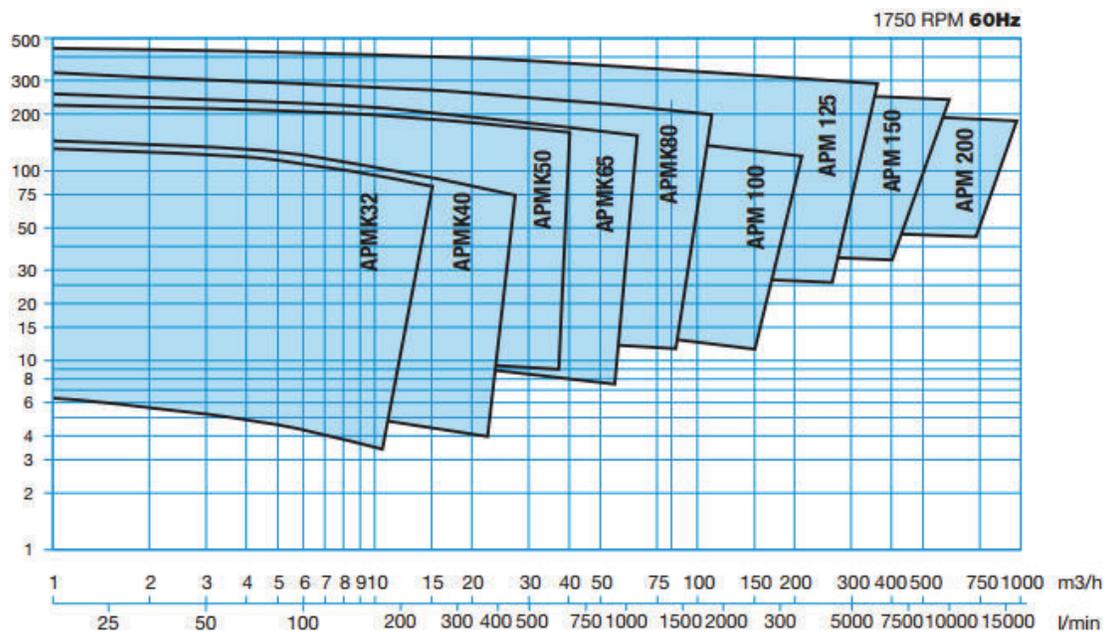
(Parte 1)

### CARACTERÍSTICAS

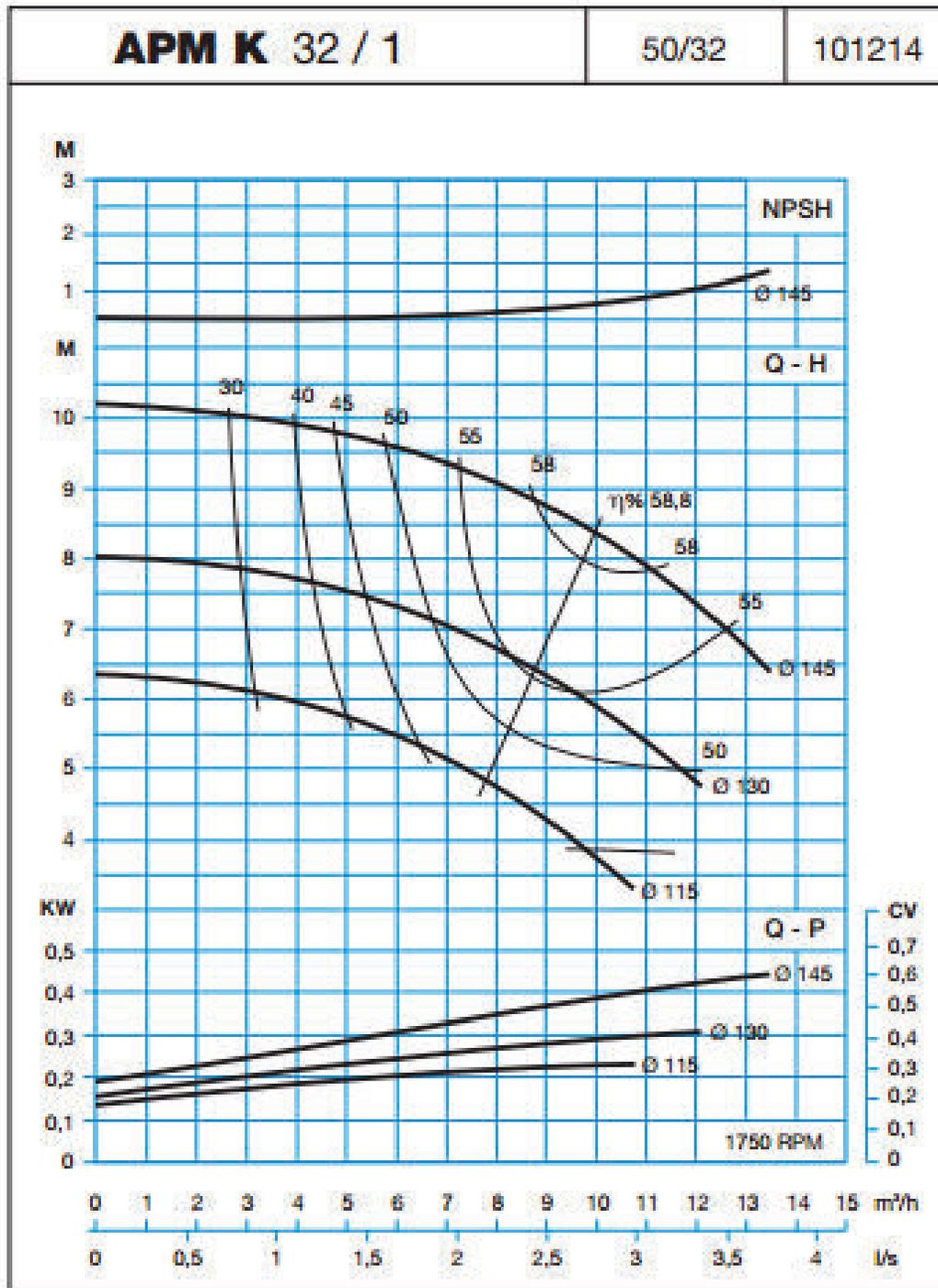
- Bombas de eje horizontal.
- Impulsores cerrados, casquillos eje y rodamientos lubricados por grasa.
- Cuerpos de aspiración e impulsión con bridas PN16 a PN40.
- Temperatura max. Del líquido: +110°C
- Construcción en empaquetadura y cierre mecánico.

### APLICACIONES

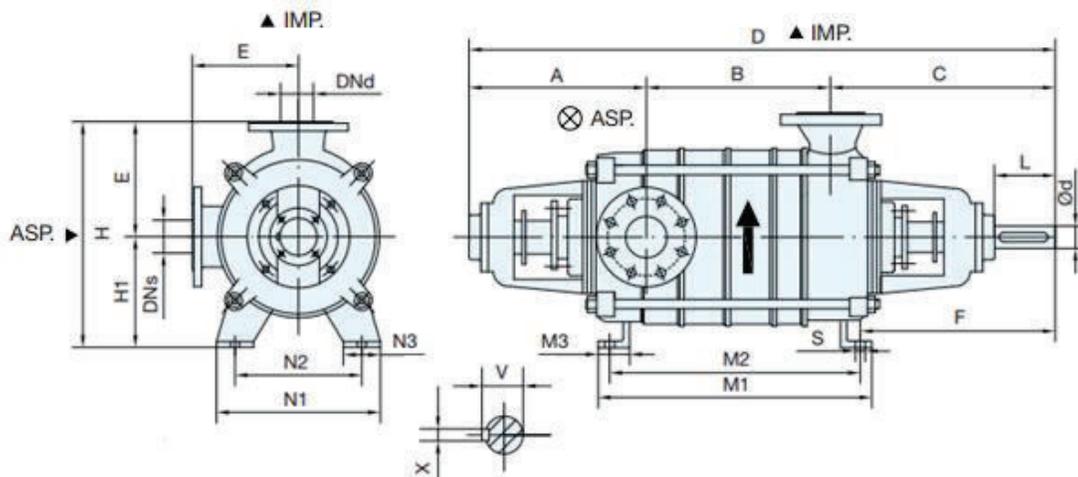
- Abastecimiento y distribución de agua.
- Equipos de presión y contraincendios.
- Tratamiento de aguas.
- Instalaciones de riego, sanitarias, de limpieza y en general.
- Instalación de alimentación de calderas, circulación y condensados.



(Parte 2)



(Parte 3)



| Descripción | APMK32          |     |     |     |     |
|-------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| DNs mmØ     | 50              |     |     |     |     |
| DNd mmØ     | 32              |     |     |     |     |
| H mm        | 310             |     |     |     |     |
| D mm        | B+450           |     |     |     |     |
| Peso KG     | 72              |     |     |     |     |
|             | Número de Fases |     |     |     |     |
|             | 2               | 3   | 4   | 5   | 6   |
| B mm        | 124             | 178 | 232 | 286 | 340 |
|             | Número de Fases |     |     |     |     |
|             | 7               | 8   | 9   | 10  |     |
| B mm        | 394             | 448 | 502 | 556 |     |
|             | Número de Fases |     |     |     |     |
|             | 11              | 12  | 13  | 14  |     |
| B mm        | 610             | 664 | 718 | 772 |     |

### ANEXO 3. Válvula mezclador tres vías TR24-SR-T US.

(Parte 1)

#### Válvula de control caracterizado de tres vías, Bola y Vástago de Latón Cromado Actuador TR, On-Off/Punto Flotante BELIMO

##### Datos Técnicos/Presentación



##### Aplicación

Esta válvula se usa en general en serpentines de refrigeración y de calefacción, tanto en unidades de aire acondicionado como en unidades fan coil. Otras aplicaciones comunes incluyen unidades de ventilación, serpentines VAV de recalentamiento y circuitos de derivación.

Esta válvula es adecuada para sistemas hidráulicos de caudal variable o constante. Diseñada para áreas reducidas en donde se requieran control on/off o punto flotante con 24VAC.

| Especificaciones de válvula                |   |
|--|---|
| Servicio                                   | Agua fría y caliente, glicol al 60%   |
| Características de flujo                   | Puerto A igual porcentaje<br>Puerto B lineal modificado<br>para flujo AB constante  |
| Acción                                     | 95° rotación max.   |
| Tamaños                                    | 1/2" , 3/4"   |
| Tipo de acople                             | NPT hembra  |
| Materiales:                                |   |
| Cuerpo                                     | Latón forjado, niquelado  |
| Bola                                       | Latón cromado   |
| Vástago                                    | Latón   |
| Asientos                                   | PTFE  |
| Disco caracterizador                       | TEFZEL*   |
| Guarnición                                 | 2 O-rings EPDM, Lubricados  |
| Presión nominal                            | 600 psi   |
| Rango temp. Media                          | 0°F a212°F (-18°C a 100°C)  |
| Presión de cierre                          | 200 psi   |
| Presión diferencial: máxima ( $\Delta P$ ) | Para puerto A caracterizado<br>20 psi en aplicaciones típicas<br>30 psi máx. en servicio silencioso<br><br>Para versiones de flujo completo (sin disco A)<br>Control On/Off 150 psi |
| Estanqueidad                               | Puerto A 0%<br>Puerto B: 0,5% -2% del CV completo<br>Puerto AB: 0%  |
| Valor Cv                                   | Puerto A: ver valores en tabla de producto<br>Puerto B: 70% del caudal en puerto A  |

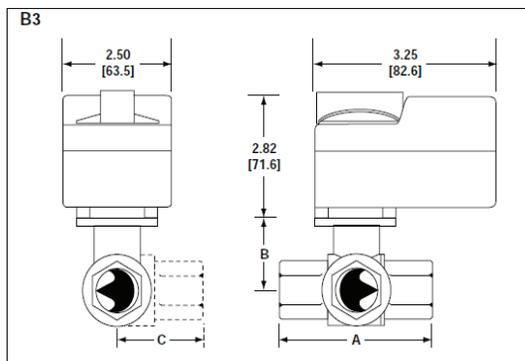
## (Parte 2)

| Especificaciones de Actuador |   |
|------------------------------|---|
| TR24-3-T US                  |   |
| Control                      | On-off/Punto flotante   |
| Impedancia de entrada        | 0,36 K $\Omega$   |
| Voltaje nominal              | 24 VCA 50/60 Hz   |
| Rango de voltaje nominal     | 19.2... 28.8 VCA  |
| Consumo                      | 1W  |
| Transformador                | 1VAC (fuente clase 2)   |
| Conexión eléctrica           | Bornes a rosca accesibles tras remoción de una pequeña tapa (cables 3 ft, 6 ft, 10 ft opcionales) |
| Angulo de rotación           | 90°C  |
| Indicación de posición       | Integrada en manivela   |
| Control manual               | Manivela de presión   |
| Tiempo de operación          | 90 segundos @ 60 Hz<br>1068 segundos @50 Hz   |
| Humedad                      | 5 a 95 % sin condensado   |
| Temp. Ambiente               | 19°F a 122°F (-7°C -+50°C)  |
| Temp. De almacenamiento      | 40°F a 176°F (-40°C +80°C)  |
| Gabinete                     | NEMA 1  |
| Clasificación de gabinete    | UL94-5V(B)  |
| Registro oficial             | CE, UL 60730-1  |
| EMC                          | CE conforme a 89/336/EEC  |
| Modo de operación            | Tipo 1 en UL 60730-1  |
| Nivel de ruido               | máx. 35 db (A)  |
| Estándar de calidad          | ISO 90001   |

## Modelos adicionales

|               |                                |
|---------------|--------------------------------|
| TR24-3 US     | TR24-3-T US cable plenum 3 ft  |
| TR24-3/300 US | TR24-3-T US cable plenum 10ft  |
| TR24-3/500 US | TR24-3-T US cable plenum 16 ft |

## Dimensiones



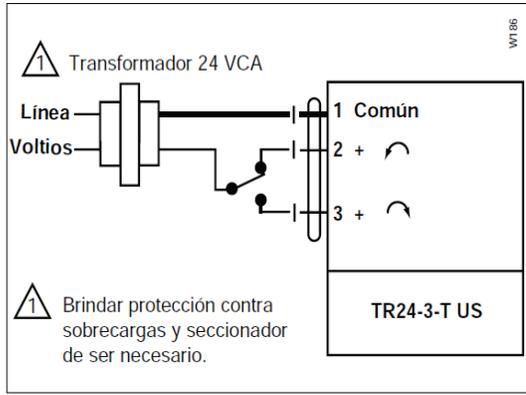
| Cuerpo de válvula | Tamaño de válvula nominal |      | Dimensiones |             |             |
|-------------------|---------------------------|------|-------------|-------------|-------------|
|                   | in                        | [mm] | A           | B           | C           |
| B307B-B311B       | 1/2"                      | 15   | 2.06 [52.2] | 1.39 [35.3] | 1.07 [27.2] |
| B312B-B315B       | 1/2"                      | 15   | 2.38 [60.5] | 1.63 [41.4] | 1.37 [33.3] |
| B317B-B320B       | 3/4"                      | 20   | 2.63 [66.8] | 1.75 [44.5] | 1.38 [35.1] |

## Patrón de Flujo

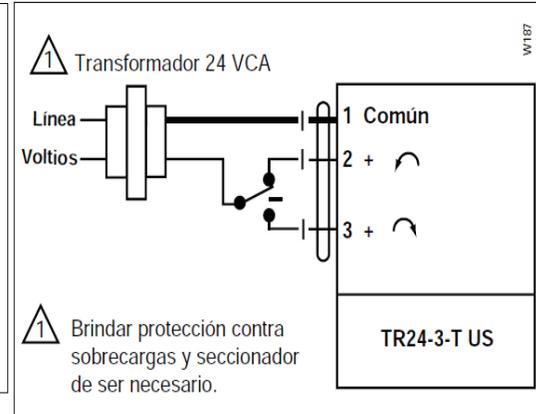


(Parte 3)

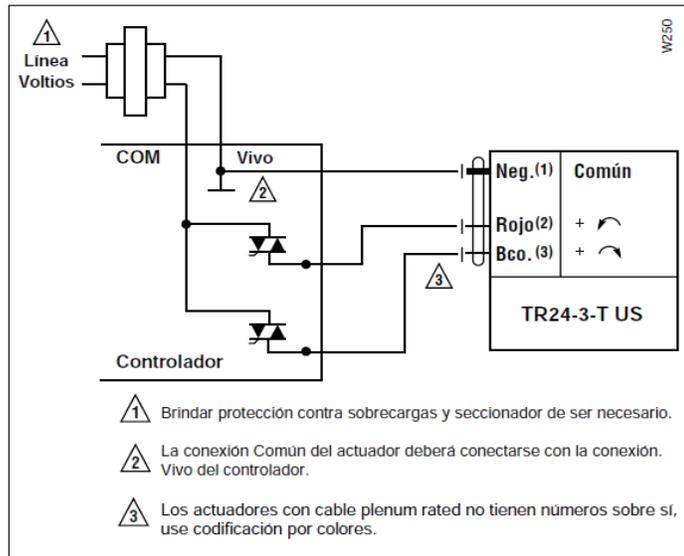
Cableado



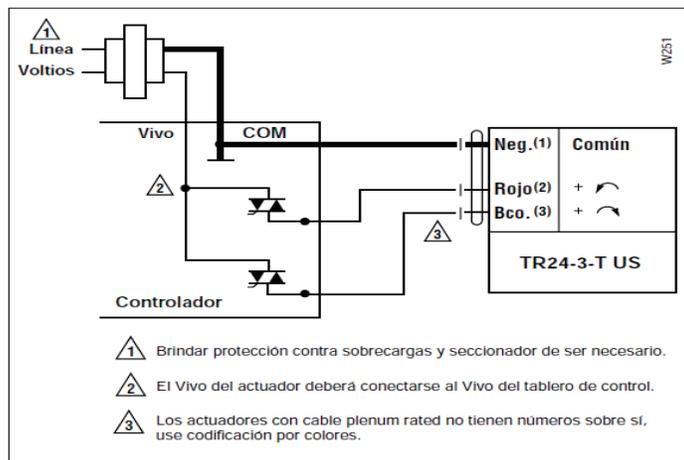
Control On/Off del TR24-3-T US.  
Puede no usarse un cable de control.



Control Flotante del TR24-3-T US



Triac Sink



Triac Source

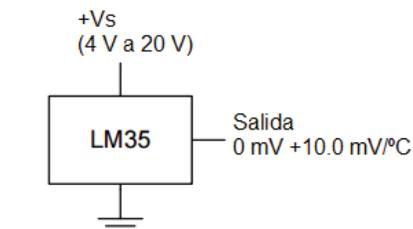
## ANEXO 4. Sensor de Temperatura LM35.

(Parte 1)

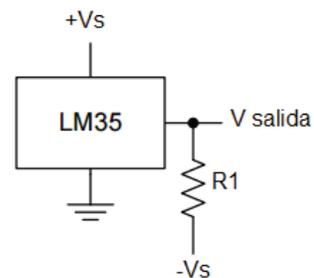
### Características

- Directamente calibrado en grados Celsius
- Factor de escala lineal de 10 mV/°C
- Exactitud de  $\pm 0.5$  °C a temperatura ambiente (25 °C)
- Temperatura de operación: -55 °C a +150 °C
- Adecuado para aplicaciones remotas
- Bajo costo debido al recorte de nivel de agua
- Voltaje de operación: 4 V a 30 V
- Consumo de corriente: < 60  $\mu$ A típico
- Bajo autocalentamiento: 0.08 °C con aire en reposo
- Baja impedancia de salida: 0.1  $\Omega$  con carga de 1 mA

### Tipos de Aplicación



**Sensor de Temperatura Básico**  
(+2 °C a +150 °C)



$$R1 = -V_s / 50 \mu A$$

$$V_{salida} = 1500 \text{ mV a } 150 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$V_{salida} = 250 \text{ mV a } 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$V_{salida} = -550 \text{ mV a } -55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

**Sensor de Temperatura varios rangos**

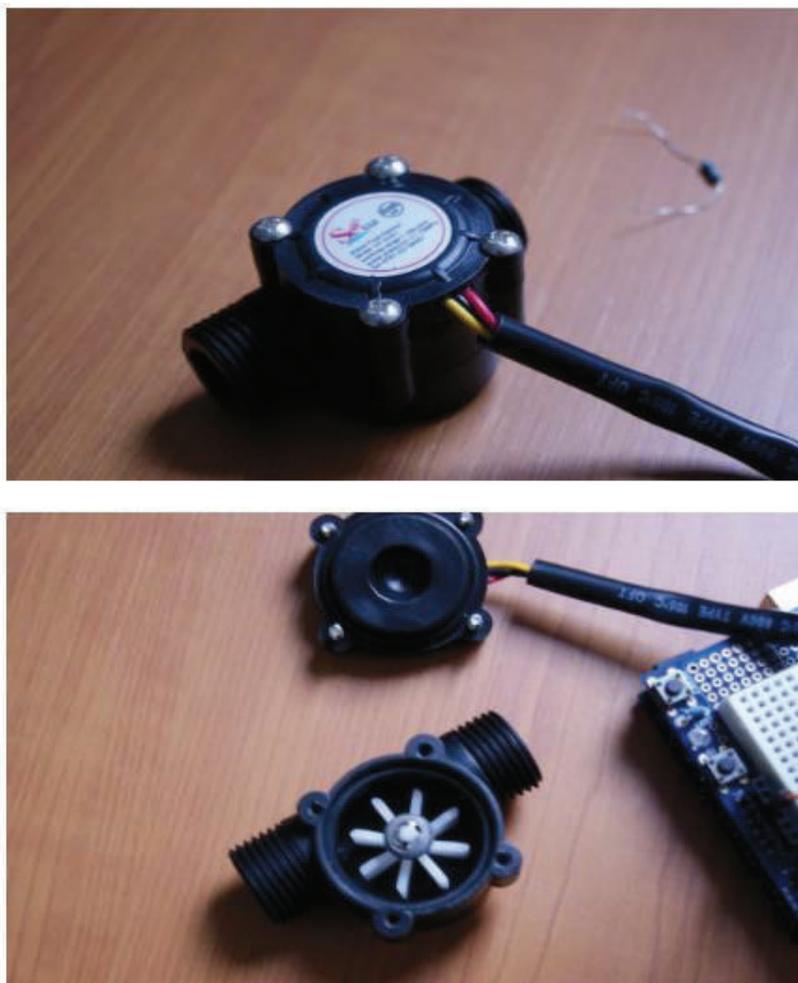
## (Parte 2)

## Características eléctricas

| Parámetros   | Condición  | LM35A           |                  |                  | LM35CA          |                  |                  | UNIDAD MAXIMA |
|--|--|-----------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|---------------|
|  |  | Dato Especifico | Límite de prueba | Límite de diseño | Dato Especifico | Límite de prueba | Límite de diseño |               |
| Exactitud  | T A =+25 °C                                      | ±0.2            | ±0.5             |                  | ±0.2            | ±0.5             |                  | °C            |
|  | T A =-10 °C                                      | ±0.3            |                  |                  | ±0.3            |                  | ±1.0             | °C            |
|  | T A = T MAX                                      | ±0.4            | ±1.0             |                  | ±0.4            | ±1.0             |                  | °C            |
|  | T A = T MIN                                      | ±0.4            | ±1.0             |                  | ±0.4            |                  | ±1.5             | °C            |
| No Linealidad  | T MIN ≤ T A ≤ T MAX                              | ±0.18           |                  | ±0.35            | ±0.15           |                  | ±0.3             | °C            |
| Ganancia del sensor                                    | T MIN ≤ T A ≤ T MAX                              | +10.0           | +9.9<br>+10.1    |                  | +10.0           |                  | +9.9<br>+10.1    | mV/°C         |
| Carga de Regulación                                    | T A =+25 °C                                      | ±0.4            | ±1.0             | ±3.0             | ±0.4            | ±1.0             |                  | mV/mA         |
|  | T MIN ≤ T A ≤ T MAX                              | ±0.5            |                  |                  | ±0.5            |                  | ±3.0             | mV/mA         |
| Línea de Regulación                                    | T A =+25 °C                                      | ±0.01           | ± 0.05           | ±0.1             | ±0.01           | ±0.05            |                  | mV/V          |
|  | 4 V <sub>s</sub> ≤ V <sub>s</sub> ≤ 30 V         | ±0.02           |                  |                  | ±0.02           |                  | ±0.1             | mV/V          |
| Corriente de consumo                                   | V <sub>s</sub> = +5V, +25°C                      | 56              | 67               |                  | 56              | 67               |                  | μA            |
|  | V <sub>s</sub> = +5V                             | 105             |                  | 131              | 91              |                  | 114              | μA            |
|  | V <sub>s</sub> = +30V, +25°C                     | 56.2            | 68               |                  | 56.2            | 68               |                  | μA            |
|  | V <sub>s</sub> = +30V                            | 105.5           |                  | 133              | 91.5            |                  | 116              | μA            |
| Variación de la Corriente de consumo                   | 4 V <sub>s</sub> ≤ V <sub>s</sub> ≤ 30 V, +25 °C | 0.2             | 1.0              | 2.0              | 0.2             | 1.0              |                  | μA            |
|  | 4 V <sub>s</sub> ≤ V <sub>s</sub> ≤ 30 V         | 0.5             |                  |                  | 0.5             |                  | 2.0              | μA            |
| Coefficiente de Temperatura de la corriente de consumo |  | +0.39           |                  | +0.5             | +0.39           |                  | +0.5             | μA/°C         |
| Temperatura mínima para trabajo nominal                | Circuito Básico<br>I <sub>L</sub> = 0            | +1.5            |                  | +2.0             | +1.5            |                  | +2.0             | °C            |
| Precisión a largo tiempo de utilización                | T <sub>J</sub> = T MAX para<br>1000 horas        | ±0.08           |                  |                  | ±0.08           |                  |                  | °C            |

## ANEXO 5. Sensor de Caudal YF-S201

(Parte 1)



### Características

- Modelo: YF-S201
- Tipo de sensor: Hall Effect
- Voltaje de funcionamiento: 5 a 18 V DC
- Max consumo de corriente: 15 mA a 5 V
- Tipo de salida: 5V TTL
- Trabajo Caudal: de 1 a 30 litros / minuto
- Temperatura de funcionamiento: -25 a 80 °C
- Humedad de trabajo Rango: 35 % - 80 %% de humedad relativa.

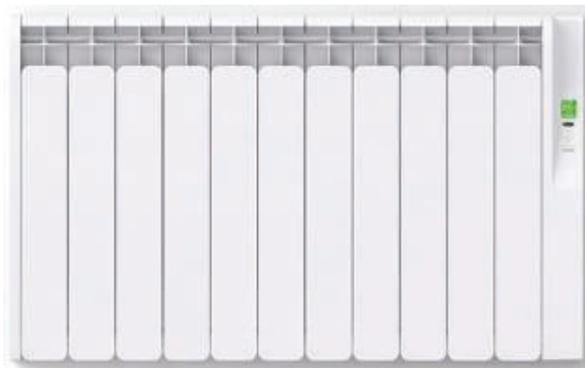
## (Parte 2)

- Precisión:  $\pm 2\%$
- Rango de flujo: 1-30 L/min
- Modo de detección: vertical
- Presión máxima del agua: 2.0 MPa
- Ciclo de trabajo de la salida: 50% + 10%
- Tiempo de subida de la salida: 0.04 us
- Tiempo de caída de la salida: 0.18 us
- Velocidad de flujo características del pulso: Frecuencia (HZ) =  $7.5 * \text{Caudal}$  (L / min)
- Pulsos por litro :450
- Durabilidad: un mínimo de 300.000 ciclos
- Longitud del cable: 15 cm
- $\frac{1}{2}$  "conexiones nominales de tubería. 0.78" de diámetro exterior,  $\frac{1}{2}$ " de la rosca
- Tamaño: 2.5" x 1.4" x 1.4

**ANEXO 6.** Intercambiador de Calor SYGMA SRN1100RAD y SRN1300RAD.

(Parte 1)

Los radiadores de 10 elementos de 1100W y 1300W de potencia de la gama SYGMA son lo último de Rointe en emisores térmicos de bajo consumo, son programable desde el propio radiador, desde la estación central EASY TOUCH o desde el mando Air control.



La gama de radiadores Rointe SYGMA Pro combina un cuerpo de aluminio inyectado de alta pureza con los últimos avances en tecnología para otorgar a tu estancia un calor confortable con el consumo más ajustado.

**BAJO CONSUMO**

La potencia media consumida por los radiadores SYGMA Pro supone tan solo el 40% de su potencia nominal.

**DISEÑO OPTIMIZADO PARA LA MÁXIMA DISIPACIÓN DEL CALOR**

Máximo rendimiento gracias al nuevo diseño de la espada, aletas y los 98 mm de profundidad de cada elemento, con volumen para un 50 % más de fluido térmico.

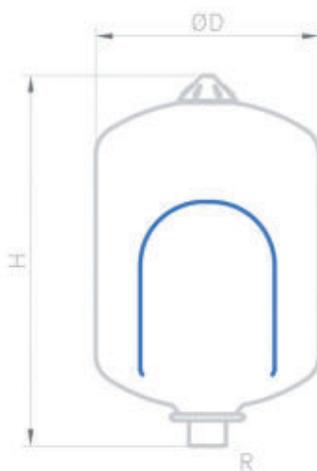


## ANEXO 7. Tabla para selección de vasos de expansión para viviendas

### Acumuladores Hidroneumáticos de membrana

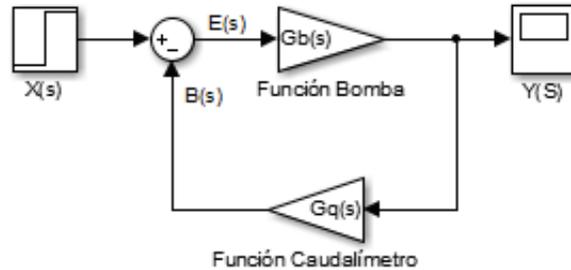
#### Grupos de presión

- Especialmente concebidos para prolongar su vida y minimizar su mantenimiento
- Membrana no recambiable según EN 13831, apta para agua potable
- Conexión de agua de acero inoxidable
- Temperatura: -10° C +100° C
- Pintura polvo azul, especial para intemperie (RAL 5012)
- Precarga de Nitrógeno: 3 bar
- Certificado CE, conforme a la Directiva 97/23/CE



| Peso (Kg) | Código   | Modelo      | Capacidad (Lt) | Presión Máx. (bar) | Dimensiones |        | R Conexión Agua |
|-----------|----------|-------------|----------------|--------------------|-------------|--------|-----------------|
|           |          |             |                |                    | Ø D (mm)    | H (mm) |                 |
| 0,8       | 06100210 | 2 AMF-PLUS  | 2              | 10                 | 110         | 245    | 1"              |
| 2         | 06100510 | 5 AMF-PLUS  | 5              | 10                 | 200         | 250    | 1"              |
| 2,5       | 06100810 | 8 AMF-PLUS  | 8              | 10                 | 200         | 340    | 1"              |
| 3,2       | 06100210 | 12 AMF-PLUS | 12             | 10                 | 270         | 310    | 1"              |
| 4         | 06102010 | 20 AMF-PLUS | 20             | 10                 | 270         | 415    | 1"              |
| 5,6       | 06102510 | 25 AMF-PLUS | 25             | 10                 | 320         | 430    | 1"              |
| 7         | 06103510 | 35 AMF-PLUS | 35             | 10                 | 360         | 475    | 1"              |
| 10        | 06105010 | 50 AMF-PLUS | 50             | 10                 | 360         | 620    | 1"              |

**ANEXO 8.** Análisis matemático para el controlador PID del sistema de lazo cerrado para una bomba de recirculación.



$$E(s) * Gb(s) = Y(s) \quad (1)$$

$$X(s) - B(s) = E(s) \quad (2)$$

$$Gq(s) * Y(s) = B(s) \quad (3)$$

Reemplazo ecuación (3) en (2):

$$X(s) - Gq(s) * Y(s) = E(s) \quad (4)$$

Reemplazo ecuación (4) en (1):

$$[X(s) - Gq(s) * Y(s)] * Gb(s) = Y(s)$$

$$X(s) * Gb(s) = Y(s) * [1 + Gb(s) * Gq(s)]$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Gb(s)}{1 + Gb(s) * Gq(s)} \quad (5)$$

Donde:

- Función de transferencia de la bomba:  $Gb(s) = 0.89$
- Función de transferencia del caudalímetro:  $Gq(s) = 0.01$

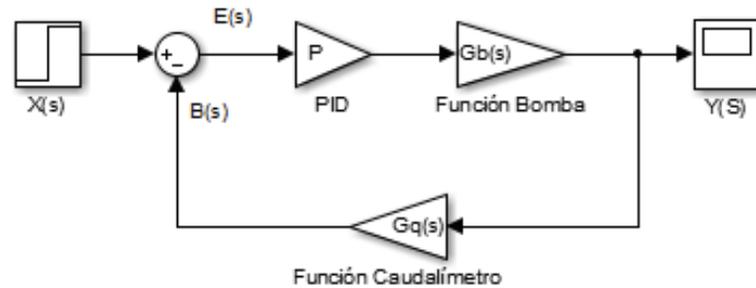
Reemplazando en la ecuación 5 queda lo siguiente:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{6.4}{1 + (6.4)(0.01)} = 6.02$$

Ante una Entrada Paso Unitario  $X(s) = 1/s$ , la respuesta  $Y(s)$  es:

$$Y(s) = 6.02 * X(s) = \frac{6.02}{s} \quad (6)$$

Como se ve en la ecuación 6, solo se necesita un controlador proporcional eliminar el error en estado estable, es decir, el numerador de la ecuación 6 debe llegar a la unidad del paso Unitario.



De la ecuación 5, se obtiene que:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{P * G_b(s)}{1 + P * G_b(s) * G_q(s)}$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{6.4 * P}{1 + 6.4 * 0.01 * P}$$

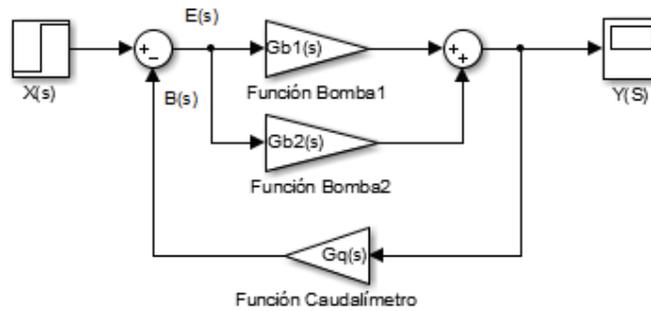
Si  $X(s) = Y(s) = 1/s$ ,

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{6.4 * P}{1 + 0.064 * P} = 1$$

$$6.4 * P = 1 + 0.064 * P$$

$$P = 0.158$$

**ANEXO 9.** Análisis matemático para el controlador PID del sistema de lazo cerrado para dos bombas de recirculación en paralelo.



$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Gb1(s) + Gb2(s)}{1 + [Gb1(s) + Gb2(s)] * Gq(s)} \quad (1)$$

Donde:

- Función de transferencia de la bomba:  $Gb1(s) = Gb2(s) = 0.89$
- Función de transferencia del caudalímetro:  $Gq(s) = 0.01$

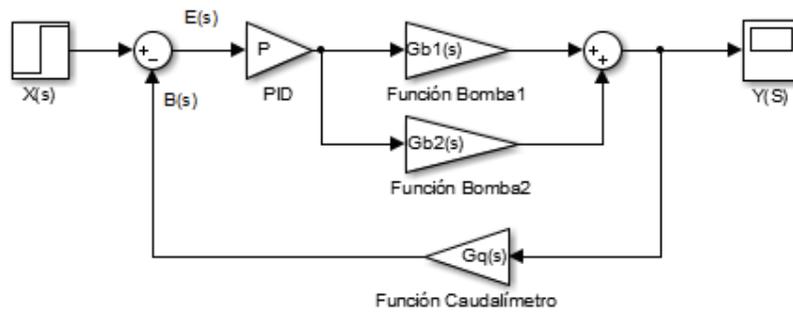
Reemplazando en la ecuación 1 queda lo siguiente:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{6.4 + 6.4}{1 + (6.4 + 6.4)(0.01)} = 11.34$$

Ante una Entrada Paso Unitario  $X(s) = 1/s$ , la respuesta  $Y(s)$  es:

$$Y(s) = 11.34 * X(s) = \frac{11.34}{s} \quad (2)$$

Como se ve en la ecuación 2, solo se necesita un controlador proporcional eliminar el error en estado estable, es decir, el numerador de la ecuación 2 debe llegar a la unidad del paso Unitario.



De la ecuación 1, se obtiene que:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{P * [Gb1(s) + Gb2(s)]}{1 + P * [Gb1(s) + Gb2(s)] * Gq(s)}$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{(6.4 + 6.4) * P}{1 + (6.4 + 6.4) * 0.01 * P} = \frac{12.8P}{1 + 0.128 * P}$$

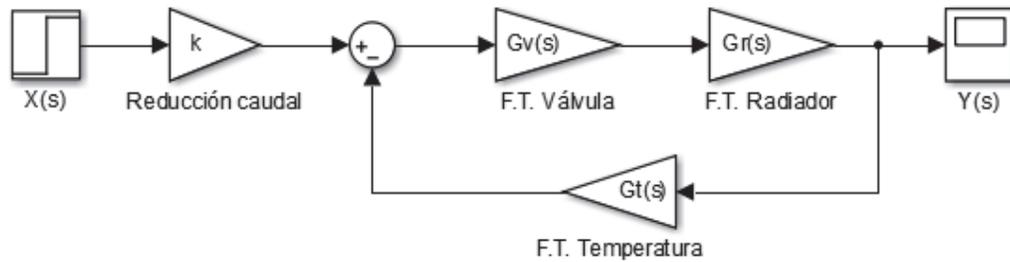
Si  $X(s) = Y(s) = 1/s$ ,

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{12.8 * P}{1 + 0.128 * P} = 1$$

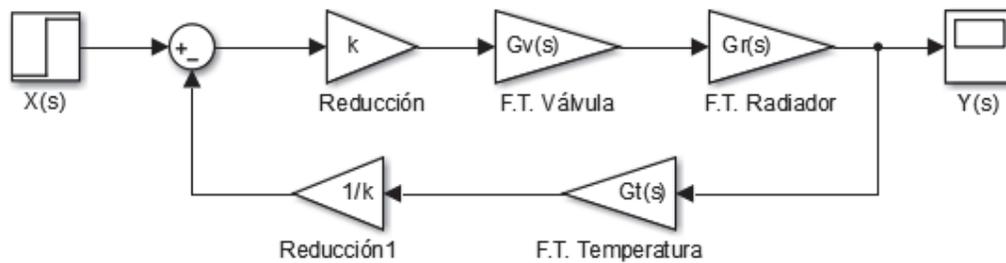
$$12.8 * P = 1 + 0.128 * P$$

$$P = 0.079$$

**ANEXO 10.** Comportamiento del sistema en lazo cerrado con respecto al sensor de temperatura.



Se debe resolver el diagrama de bloques, mediante el uso de equivalencias.



$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k * Gv(s) * Gr(s)}{1 + \frac{k * Gv(s) * Gr(s) * Gt(s)}{k}} \quad (1)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k * Gv(s) * Gr(s)}{1 + Gv(s) * Gr(s) * Gt(s)} \quad (2)$$

Donde:

- Función de transferencia de la temperatura:  $Gt(s) = 0.12$
- Función de transferencia de la válvula:  $Gv(s)$  y la constante de tiempo es 4 segundos.

$$Gv(s) = \frac{a}{4s + 1}$$

- Función de transferencia del radiador:  $Gt(s)$

$$Gr(s) = \frac{b}{cs + 1}$$

Reemplazando en la ecuación 2, se tiene:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k * \frac{a}{4s+1} * \frac{b}{cs+1}}{1 + \frac{a}{4s+1} * \frac{b}{cs+1} * 0.12} \quad (2)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\frac{abk}{(4s+1)(cs+1)}}{\frac{(4s+1)(cs+1)+0.12ab}{(4s+1)(cs+1)}}$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{abk}{4cs^2 + (4 + c)s + (1 + 0.12ab)} \quad (3)$$

Para determinar el comportamiento del sistema en lazo cerrado, mediante la ecuación 3 se determinará la frecuencia natural o coeficiente de amortiguamiento “ $\xi$ ” y atenuación “ $W_n$ ”.

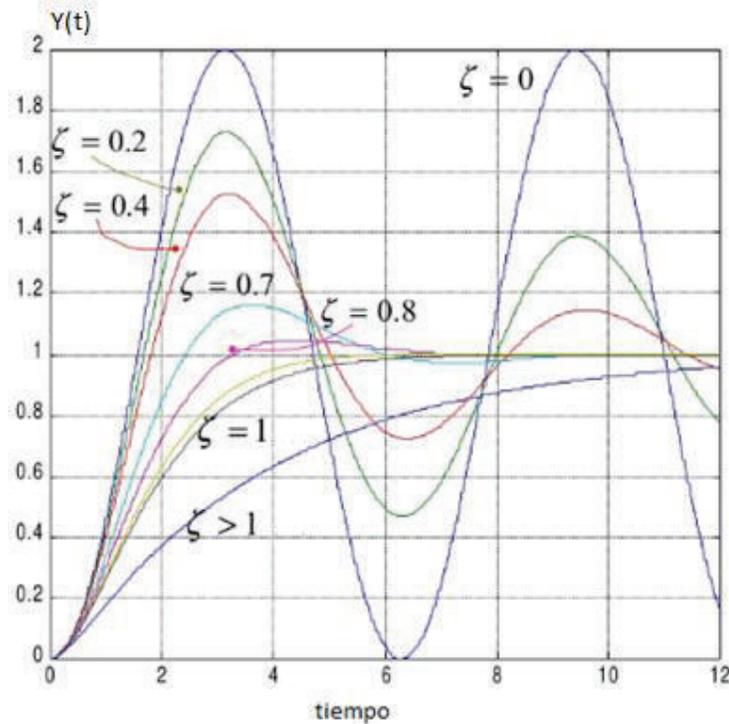
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W_n^2}{s^2 + 2\xi W_n * s + W_n^2} \quad (4)$$

Donde:

$$W_n = \sqrt{1 + 0.12ab} \quad \xi = \frac{4 + c}{2W_n} \quad (5)$$

Para una entrada escalón unitario, se estudiará tres casos del coeficiente de amortiguamiento, visto en la Figura:

- **Caso 1.** Cuando ( $0 < \xi < 1$ ) el sistema es sub-amortiguado; se produce oscilaciones hasta que se vuelve estable, a excepción cuando  $\xi = 0$  ahí se produce oscilaciones infinitas.
- **Caso 2.** Cuando ( $\xi = 1$ ), los polos son casi iguales, el sistema se aproxima mediante uno críticamente amortiguado.
- **Caso 3.** Cuando ( $\xi > 1$ ), el sistema es sobre-amortiguado; los polos son reales negativos y diferentes.



Respuesta al escalón de diferentes sistemas de segundo orden

Se tiene 2 casos que se va a estudiar, para el radiador de 1.1 y 1.32 KW.

- Con el Radiador de 1,1 KW se tiene lo siguiente:
  - Función de transferencia de la válvula:  $G_v(s)$

$$G_v(s) = \frac{a}{4s + 1} = \frac{0.23}{4s + 1}$$

- Función de transferencia del radiador:  $G_t(s)$

$$G_r(s) = \frac{b}{cs + 1} = \frac{0.55}{0.067s + 1}$$

Reemplazando en la ecuación 5, se tiene:

$$W_n = \sqrt{1 + 0.12(0.23)(0.55)} = 1.007$$

$$\xi = \frac{4 + c}{2W_n} = \frac{4 + 0.067}{2(1.007)} = 1.98 > 1$$

El sistema es sobre-amortiguado.

- Con el Radiador de 1,32 KW se tiene lo siguiente:

- Función de transferencia de la válvula:  $G_v(s)$

$$G_v(s) = \frac{a}{4s + 1} = \frac{0.28}{4s + 1}$$

- Función de transferencia del radiador:  $G_t(s)$

$$G_t(s) = \frac{b}{cs + 1} = \frac{0.46}{0.066s + 1}$$

Reemplazando en la ecuación 5, se tiene:

$$W_n = \sqrt{1 + 0.12(0.28)(0.46)} = 1.008$$

$$\xi = \frac{4 + c}{2W_n} = \frac{4 + 0.066}{2(1.008)} = 1.99 > 1$$

El sistema es sobre-amortiguado.