

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PARA LA EVALUACIÓN DE
DIVERSOS SISTEMAS DE CONTROL DE LA OPERACIÓN DE UNA RED
HIDRONICA, APLICADA A SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN O CALEFACCIÓN**

OSCAR JAVIER MARTINEZ MARTINEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PARA LA EVALUACIÓN DE
DIVERSOS SISTEMAS DE CONTROL DE LA OPERACIÓN DE UNA RED
HIDRONICA, APLICADA A SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN O CALEFACCIÓN**

OSCAR JAVIER MARTINEZ MARTINEZ

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero mecánico**

Director:

**Omar Armando Gelvez Arocha
Ingeniero mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

TABLA DE CONTENIDO

Pág

INTRODUCCION	14
1. OBJETIVOS	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.1.1 Objetivos Específicos.....	16
2. SISTEMA DE CALEFACCION	18
2.1. CONFORT	18
1.2. INSTALACIONES DE CALEFACCIÓN	21
2.2.1 Sistema de aporte de calor..	24
2.2.2 Sistema De transporte.	27
1.2.3 Sistema de regulación de flujo.	44
1.2.4 Sistema De transferencia de calor en la unidad terminal..	58
2. DISEÑO CONCEPTUAL DEL BANCO	60
2.1 CONDICIONES DE DISEÑO DEL BANCO	62
2.2 ESCENARIOS DE CONTROL	63
3 CARACTERISTICAS DE LA CONSTRUCCIÓN DEL BANCO	66
3.1 JUSTIFICACIÓN DEL TAMAÑO DE LOS COMPONENTES.....	66

3.2 DETERMINACIÓN DEL CALOR DISIPADO Y EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DEL RADIADOR.....	73
3.3 DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA DEL SISTEMA DE APORTE DE CALOR.....	77
4. FUNCIONAMIENTO DEL CONTROL REALIZADO A LA BOMBA	78
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS CURVAS DE LA BOMBA Y CURVA DE PÉRDIDAS DEL SISTEMA.....	78
6. INTERFAZ	95
7. ANÁLISIS DEL VALOR DE CONSUMO DE POTENCIA ELÉCTRICA DE LA BOMBA BAJO LA OPERACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE CONTROL	106
8. CONCLUSIONES, OBSERVACIONES.	113
BIBLIOGRAFÍA.....	115

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Distribución de un sistema de calefacción.	21
Figura 2. Elementos de aporte de calor en una red de calefacción.	22
Figura 3. Elementos de entrega de calor en una red de calefacción.	23
Figura 4. Red hidrónico global	30
Figura 5. Tubería de retorno inverso.....	32
Figura 6. Tubería de retorno directo	33
Figura 7. Bombas de desplazamiento Positivo	34
Figura 8. Bomba centrífuga.....	35
Figura 9. Curva característica de una bomba centrífuga.....	35
Figura 10. Puntos límite de operación de una bomba.....	36
Figura 11. Punto de operación sobre la curva de la bomba.....	37
Figura 12. Leyes de semejanza en bombas.	38
Figura 13. Curvas características de bombas (eficiencia, diámetros, potencia, NPSH Vs caudal, Cabeza Vs caudal).	38
Figura 14. Conexión de bombas en serie.	39
Figura 15. Curva resultante obtenida a través de la conexión de bombas en serie.	40
Figura 16. Conexión de bombas en paralelo.	41
Figura 17. Curva resultante obtenida a través de la conexión de bombas en paralelo.	41
Figura 18. Red hidrónica de retorno directo.....	42
Figura 19. Perfiles de presión presentados en las líneas de la red hidrónica	43
Figura 20. Válvula	44
Figura 21. Válvula de asiento.....	45
Figura 22. Válvula de mariposa.	46

Figura 23. Válvula de compuerta.	46
Figura 24. Electroválvula.....	47
Figura 25. Curvas inherentes del comportamiento de algunas válvulas	49
Figura 26. Curvas de características de caudal efectivas	50
Figura 27. Representación gráfica del concepto de autoridad	51
Figura 28. Característica de la válvula control Vs autoridad	52
Figura 29. Sistema de distribución a caudal variable	54
Figura 30. Sistema de distribución a caudal constante.....	56
Figura 31. Intercambiador agua-aire	58
Figura 32. Sistemas que componen el banco	61
Figura 33. Esquema general del banco de calefacción.	62
Figura 34. Regulación del sistema por válvulas con bomba de velocidad fija.....	63
Figura 35. Regulación del sistema por bomba de velocidad variable con Psuministro constante.....	64
Figura 36. Regulación del sistema por bomba de velocidad variable siguiendo la curva de pérdidas del sistema	65
Figura 37. Elementos del sistema de transporte.....	68
Figura 38. Válvula de bola y motor paso a paso	70
Figura 39. Elementos de control	71
Figura 40. Sensores de medición	71
Figura 41. Parámetros de condiciones de operación para la UM a carga máxima	73
Figura 42. Volumen de control de la UM.....	73
Figura 43. Factor de corrección	75
Figura 44. Curva de la bomba.....	80
Figura 45. Curva de eficiencia	81
Figura 46. Potencia de la bomba	82
Figura 47. Generación de las curvas de regulación del sistema para un número de caudal dado.	83
Figura 48. Generación de la nueva curva de eficiencia obtenida por la variación de las Rpm.....	84

Figura 49. Generación de la nueva curva de potencia obtenida por la variación de las Rpm.....	85
Figura 50. Curva de pérdidas del sistema.....	90
Figura 51. Modelo aplicado a la UM	91
Figura 52. Calculo del caudal manejado por la lectura de potencia en una bomba	92
Figura 53. Lectura de la potencia de la bomba según el escenario de control	93
Figura 54. Perfiles de presión en las UM	94
Figura 55. Modulo CRIO 9211 para la lectura de termocuplas	96
Figura 56. Adquisición del valor de corriente	96
Figura 57. Conexión entre el módulo 9263 con el variador de velocidad.....	97
Figura 58. Conexión del control realizado por la tarjeta arduino en los relés de estado solido.....	98
Figura 59. Interfaz.....	99
Figura 60. Selección del modo de operación.	100
Figura 61. Ingreso de la temperatura de confort	100
Figura 62. Perturbaciones.....	101
Figura 63. Caudales por zona.....	101
Figura 64. Apertura de válvulas e indicadores de caudal	102
Figura 65. Vista del punto de regulación.....	103
Figura 66. Datos de la regulación	103
Figura 67. Visualización de las temperaturas del fluido y las zonas	104
Figura 68. Frecuencia y consumo de corriente	104
Figura 69. Registro de datos.....	105
Figura 70. Datos obtenidos bajo el escenario de control RBC (regulación bajo la curva).....	107
Figura 71. Ahorro porcentual generado por la operación de la bomba bajo el escenario de control RBC	108
Figura 72. Datos obtenidos bajo el escenario de control RPC (regulación a presión constante)	110

Figura 73. Ahorro generado por la operación de la bomba bajo el escenario de control RPC.....110

Figura 74. Diferencia porcentual del ahorro entre los escenarios de control RPC y RBC.112

LISTA DE TABLAS

Pag.

Tabla 1. Condición recomendada para ambiente interior (invierno y verano)	20
Tabla 2. Especificación del elemento de impulsión.....	67
Tabla 3. Especificación de la tubería escogida para la red hidráulica	69
Tabla 4. Especificación de los elementos del sistema de control y medición	72
Tabla 5. Datos obtenidos en la medición de la bomba PEDROLLO CP 620m	79
Tabla 6. Datos obtenidos en la curva de eficiencia bomba PEDROLLO CP 620m80	
Tabla 7. Porcentaje de Ahorro de Potencia consumida bajo la operación de los escenarios de control REFERENCIA y RBC.....	107
Tabla 8. Porcentaje de Ahorro de Potencia consumida bajo la operación de los escenarios de control REFERENCIA y RPC.....	109
Tabla 9. Diferencia de la potencia consumida en un mismo rango de operación por los escenarios de control.	111

RESUMEN

TITULO:DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PARA LA EVALUACIÓN DE DIVERSOS SISTEMAS DE CONTROL DE LA OPERACIÓN DE UNA RED HIDRONICA, APLICADA A SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN O CALEFACCIÓN*

AUTOR: OSCAR JAVIER MARTINEZ MARTINEZ**

PALABRAS CLAVES: AGUA, HIDRÓNICO, CONTROL, CALEFACCIÓN.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo principal de este trabajo de grado es diseñar y construir un dispositivo experimental y didáctico para el laboratorio de sistemas térmicos y la materia refrigeración y aire acondicionado, en donde los estudiantes de la escuela de ingeniería mecánica tengan la oportunidad de entender el funcionamiento básico de un sistema hidrónico utilizado para calefacción aplicando controles en su parte térmica, como hidráulica.

Se diseñó y construyó un banco de laboratorio que está conformado una serie de procesos tales como; control PID, control proporcional, control de las RPMs de la motobomba por medio de un variador de frecuencia y ventiladores, adquisición de datos de las variables de temperatura en los recintos y del fluido, lectura del consumo de la motobomba, regulación de apertura de válvulas por acoplamiento con motor. Para lograr esto, el sistema térmico cuenta con una serie de elementos con los cuales se puede controlar el calor de suministro, el calor disipado y en la red hidráulica válvulas para equilibrio y regulación del caudal así como una motobomba centrífuga que garantiza el flujo requerido de agua en el sistema.

Por medio de la manipulación de los elementos del sistema térmico, reaccionaran los elementos que componen el sistema hidráulico en la apertura u cierre de válvulas, fijando un valor de caudal al cual por medio del control ajustara la motobomba en un punto de operación donde se obtenga el menor consumo de potencia según el modo de regulación seleccionado.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingeniería Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, DIRECTOR: OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A BANK FOR THE EVALUATION OF DIFFERENT CONTROL SYSTEMS NETWORK OPERATION hydronic, APPLIED COOLING SYSTEMS OR HEAT*

AUTHOR: OSCAR JAVIER MARTINEZ MARTINEZ**

KEYWORDS: WATER, HYDRONIC, CONTROL, HEATING.

DESCRIPTION:

The main objective of this paper grade is designing and building a didactic and experimental laboratory device for thermal systems and refrigeration and air conditioning field, where students of the school of mechanical engineering have the opportunity to understand the basic operation of hydronic heating system used to apply controls on its thermal, and hydraulic part.

It was designed and built a laboratory bench making up a series of processes such as; PID control, proportional control, the RPM control of the pump via a frequency converter and fans, data acquisition variable temperature in the enclosures and fluid consumption reading the pump, regulating valve opening by coupling with motor. To achieve this, the thermal system has a number of elements with which you can control the heat supply and heat dissipated in the hydraulic network balancing valves and flow regulation as well as a centrifugal pump which ensures the required flow water in the system.

Through manipulation of the elements of the thermal system, they will activate the elements of the hydraulic system in the opening or closing valves, setting a flow rate value which by controlling the adjust of the pump in an operating point obtaining the lowest power consumption mode selected by the regulation.

* Work Project

** Physical Faculty of Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering, DIRECTOR: OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA

INTRODUCCION

La utilización adecuada de la energía es una de las preocupaciones más relevantes en la sociedad actual, presionada por los efectos nocivos (calentamiento global, destrucción de la capa de ozono, etc.) de un uso irracional de esta cuando el hombre requiere transportarse, obtener bienes y productos o disponer de zonas acondicionadas para su confort. Los sistemas de calefacción y enfriamiento de aire para confort consumen un alto porcentaje de los requerimientos de energía de un edificio y son por lo tanto objeto de estudio para la posible aplicación de nuevas tecnologías tanto de hardware como de software que permitan ahorrarla y de esta manera ser respetuosos con el medio ambiente.

El banco de EVALUACIÓN DE DIVERSOS SISTEMAS DE CONTROL DE LA OPERACIÓN DE UNA RED HIDRÓNICA, APLICADA A SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN O CALEFACCIÓN, presenta un entorno didáctico mediante el cual se brinda al usuario detalles indispensables en el ámbito térmico y redes hidráulicas como redes de tubería, intercambiadores, turbo-maquinaria, regulación, sistemas de recolección y acción, los cuales serán indispensables a la hora de controlar y operar un equipo, brindando un campo de visión y mayor comprensión de la aplicación de los conceptos aprendidos en materias vistas con anterioridad, donde el modo de control aplicado a algunos de los elementos del banco tenga como finalidad el desarrollo de una sistema con alto ahorro energético, eficiente, mantenible, que cumpla con las condiciones de confort establecidas en un área.

Este trabajo presenta la interacción de diversos elementos con sus respectivos controles que conforman un sistema de calefacción que utiliza agua como fluido de trabajo, un calefactor eléctrico que aporta calor, radiadores como transmisores de

calor a los recintos, ventiladores, relé de estado sólido, válvulas reguladoras de caudal controladas por motor, válvulas de equilibrio, variador de frecuencia, bomba centrífuga, los cuales son monitoreados y controlados a través de un sistema en tiempo real por instrumentos electrónicos como FieldPoints y la tarjeta Arduino desde una interfaz gráfica creada en el software LABVIEW.

Los controles empleados a los elementos anteriormente nombrados harán del banco un sistema autónomo, ya que hoy en día un sistema que no se controla a sí mismo, no es automatizado y tendiera a desaparecer.

Según lo anterior y con el fin de seguir tanto la misión de la Universidad Industrial de Santander, como el trabajo realizado por los estudiantes y docentes en el laboratorios de sistemas térmicos, refrigeración y aire acondicionado de la escuela de Ingeniería Mecánica, se planteó un proyecto de grado titulado DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PARA LA EVALUACIÓN DE DIVERSOS SISTEMAS DE CONTROL DE LA OPERACIÓN DE UNA RED HIDRONICA, APLICADA A SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN O CALEFACCIÓN

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir con la misión de la universidad industrial de Santander en la formación de personas éticas de alta calidad profesional. Aplicando y ampliando los conocimientos adquiridos durante la formación universitaria asistiendo en el desarrollo de nuevas tecnologías con el diseño y construcción de un banco para el laboratorio de sistemas térmicos, Involucrando al estudiante en su formación como ingeniero en el campo térmico, enfocado en la búsqueda de sistemas de bajo consumo, eficientes y amigables con el ambiente.

1.1.1 Objetivos Específicos

Diseñar y construir un banco experimental para la simulación de la operación de un sistema hidrónico, aplicado a sistemas de acondicionamiento de aire mediante el suministro de agua fría o caliente según se requiera, compuesto por los siguientes subsistemas.

- Subsistema primario: constituido por la máquina de suministro de energía 1[KW] y una bomba para la circulación del fluido a través del todo el sistema.
- Subsistema secundario: compuesto por dos serpentines de 500[W] con sus respectivos ventiladores para simular la carga térmica; válvulas para la regulación del flujo de agua a través de los serpentines.

- Subsistema de control automático de la operación del circuito primario: permite regular la temperatura de suministro del agua y optimizar el consumo de potencia de la bomba producto de la perturbación generada por los ventiladores en el circuito secundario, de acuerdo las siguientes estrategias de control:

Control de las RPM de la bomba bajo la curva de pérdidas totales del sistema (RBC).

Control de las RPM de la bomba a presión constante (RPC).

2. SISTEMA DE CALEFACCION

Un sistema de calefacción consiste en la instalación de elementos de generación, transporte y entrega de calor a todo un espacio o solo a sectores, adecuando el ambiente a unas condiciones de temperatura y humedad que permitan una permanencia satisfactoria ya sea para residir o trabajar.

2.1. CONFORT

Desde hace mucho tiempo, el hombre ha intentado protegerse contra las inclemencias atmosféricas, cobijándose en un recinto cerrado o manipulando el aire para lograr unas condiciones más agradables en su interior, las técnicas de manipulación del estado del aire tienden a crear un “clima artificial” que proporcione el bienestar físico óptimo y evite trastornos patológicos, dentro de lo posible.

De acuerdo con esta definición podremos distinguir tres objetivos fundamentales:

- ✓ Conseguir el confort higrotérmico más adecuado.
- ✓ Evitar todo tipo de vibraciones sonoras y/o mecánicas molestas o perjudiciales.
- ✓ Eliminar los agentes patógenos que puedan existir o introducirse en el habitáculo.

A pesar de que los tres son importantes, el primero es el que se tiene más en cuenta y es el prioritario en las instalaciones de confort. Llamaremos condiciones de confort higrotérmico, aquellas en las que se alcanza el equilibrio entre el calor generado por el cuerpo humano, debido al propio metabolismo y actividad, y el disipado al medio

ambiente, de tal forma que la temperatura interna permanezca constante y no se produzca sensación de malestar o incomodidad.

Esto equivale a considerar el cuerpo humano, desde el punto de vista termodinámico, como una maquina térmica que debe ser refrigerada y que, a la vez, debe mantener una temperatura interna fija y determinada para que su rendimiento sea óptimo. Debemos tener en cuenta que el calor puede disiparse por distintas vías: convección, radiación, conducción, evaporación y aire expirado. La calidad y la cantidad de esta disipación dependerá de vestimenta y actividad del individuo, y también de las consideraciones ambientales: temperatura seca del aire, su velocidad y humedad, temperatura de las superficies “vistas” del recinto, etc.

Por otra parte la temperatura interna corporal varía con el individuo y con la actividad que realice. Esto implica que las condiciones de bienestar no sean las mismas para todas las personas y actividades o usos del habitáculo, puesto que vienen condicionadas por los hábitos, edad, sexo y complexión de los usuarios. Lo cual nos lleva a la conclusión que todas las normas de bienestar adolecen de cierto grado de relatividad y que las fiables, se elaboran mediante estudios estadísticos que deben abarcar al máximo número de sujetos. Hay que considerar también que la consecución del confort ideal, puede implicar tal costo que la instalación resulte excesivamente gravosa. Entonces será necesario reducir el nivel de bienestar y llegar una solución de compromiso.

Dada la complejidad del problema parece muy difícil que pueda llegarse a expresiones matemáticas rigurosas, que nos relacionen todas las variables que intervienen. Normalmente se establecen interrelaciones graficas de carácter empírico y, a partir de ellas se ajustan fórmulas matemáticas.

CONDICIONES INTERIORES PARA CONFORT

En general, en los casos de calefacción y para el invierno, se recomiendan las condiciones indicadas en la tabla 1. Con la calefacción la variación de temperatura se produce por debajo de las condiciones exigidas de confort en la hora de máxima carga para calefacción (ausencia de personal, iluminación o ganancia solar, y con la mínima temperatura exterior). El calor almacenado en la estructura del edificio cuando se trabaja con carga parcial (durante las horas del día) recuerde la capacidad necesaria del equipo para el funcionamiento a plena carga, lo mismo que con refrigeración.

Tabla 1. Condición recomendada para ambiente interior (invierno y verano)

TIPO DE APLICACIÓN	VERANO				
	DE LUJO		PRACTICA COMERCIAL		
	Temp seca. [°C]	humedad relativa [%]	Temp seca. [°C]	humedad relativa [%]	Variación de temperatura [°C]
CONFORT GENERAL Apartamento, chalet hotel, oficina, colegio, hospital, etc.	23-24	50-45	25-26	50-45	1 a 2
TIENDAS COMERCIALES (ocupación de corta duración) Bancos, Barbero y peluquería, Grandes almacenes, supermercados	24-26	50-45	26-27	50-45	1 a 2
APLICACIONES DE BAJO FACTOR DE CALOR SENSIBLE (carga latente elevada) Auditorio, Iglesia, Bar, Restaurante, cocina etc.	24-26	55-50	26-27	60-50	0,5 a 1
CONFORT INDUSTRIAL Secciones de montaje, Salas de máquinas, etc.	25-27	55-45	26-29	60-50	2 a 3

Uno de los más utilizados es el confeccionado por ASHRAE, para aire en calma. Ahora bien debemos tener en cuenta que esta sensación de bienestar no es universal, depende en gran medida del sujeto y de su actividad; así por ejemplo, en el análisis de las temperaturas óptimas para calefacción, según una encuesta, una temperatura de 18 [°C] fue considerada aceptable para un 50 % de los hombres y solo un 40% de las mujeres.

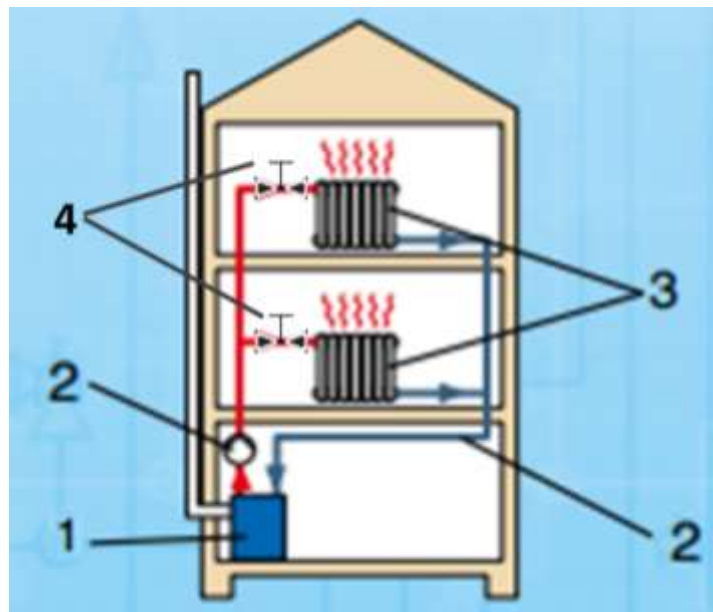
Por lo tanto, todos los datos sobre la sensación de confort térmico tendrán un carácter meramente estadístico, en verano la temperatura optima es alrededor de 22 [°C] y en invierno 21 [°C].

1.2. INSTALACIONES DE CALEFACCIÓN

Básicamente, una instalación de calefacción actual tiene cuatro partes, como se muestran en la figura 1.

1. Sistema de aporte de calor
2. Sistema de transporte
3. Sistema de transferencia de calor en la unidad terminal
4. Sistema de regulación del fluido

Figura 1. Distribución de un sistema de calefacción.

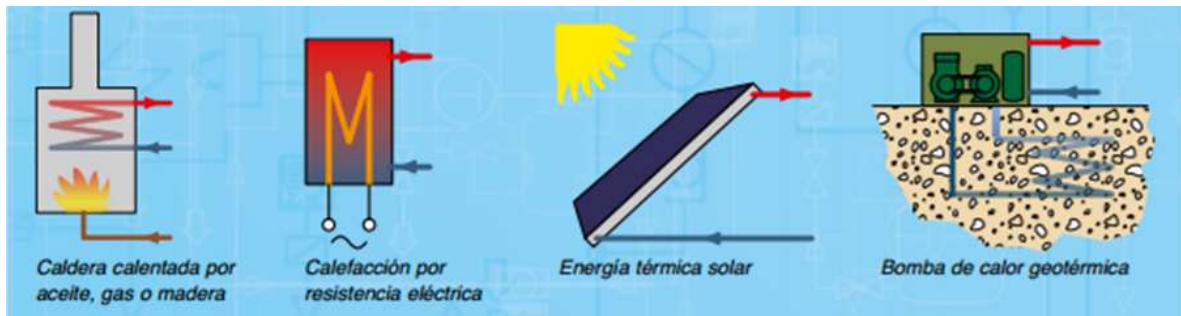


Fuente: GUNT HAMBURG. Calefacción y ventilación: sistemas de calefacción en edificios. Disponible en Internet: http://www.gunt.de/download/intro_heat_build_spanish.pdf

A continuación se explicara en detalle los componentes que pueden utilizarse en cada uno de los sistemas mostrados en la figura 1.

SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CALOR, que puede ser una caldera de combustible, un sistema de resistencias eléctricas, o aprovechamiento de energía calorífica natural o residual, como se puede ver en la figura 2.

Figura 2. Elementos de aporte de calor en una red de calefacción.



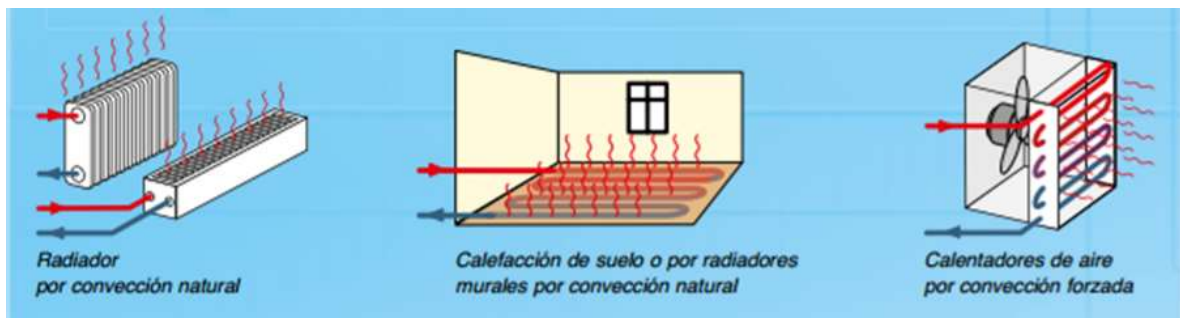
Fuente: GUNT HAMBURG. Calefacción y ventilación: sistemas de calefacción en edificios. Disponible en Internet: http://www.gunt.de/download/intro_heat_build_spanish.pdf

SISTEMA DE TRANSPORTE, mediante conductos por los que circula el fluido trabajo, normalmente agua o aire, impulsados por una bomba o ventilador.

SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA UNIDAD TERMINAL, por medio de elementos terminales (radiadores, paramentos radiantes, rejillas de impulsión para aire), ver figura 3.

Básicamente, los sistemas de calefacción más utilizados son como aportante de calor al fluido (caldera) y como aportante de calor al ambiente (radiadores de agua), y la combinación de aportante de calor al fluido (caldera) con aportante de calor al ambiente (losa o suelo radiante), de acuerdo a las necesidades,

Figura 3. Elementos de entrega de calor en una red de calefacción.



Fuente: GUNT HAMBURG. Calefacción y ventilación: sistemas de calefacción en edificios. Disponible en Internet: http://www.gunt.de/download/intro_heat_build_spanish.pdf

SISTEMA DE REGULACION, mediante válvulas las cuales controlan el caudal que circula por las líneas hacia los elementos de entrega.

A continuación abarcaremos a profundidad cada uno de los sistemas.

2.2.1 Sistema de aporte de calor. Según la instalación hay dos tipos de producción de calor: centralizadas o unitarias. En la centralizada se produce el calor en un lugar y se reparte mediante conducciones hacia los locales que hay que calentar (caldera produce vapor y este es transportado para la realización de diferentes procesos). En el segundo, un solo aparato produce el calor y lo emite en un local (calentador de agua para la ducha).

Las siguientes son fuentes donde se obtiene calor para la realización de un proceso.

➤ ***Por combustibles***

El calentamiento más lógico y más económico es una caldera de combustible sólido, líquido o gaseoso. Los inconvenientes del fuego y del aire para la combustión están limitados porque esta caldera se sitúa en un local específico.

Las calderas de combustible sólido se diferencian de las demás porque su combustión es continua, es decir, una vez que se encienden, solamente se apagan cuando se acaba el combustible (o se corta completamente la entrada de aire). La regulación de la potencia se hace variando la entrada del aire. Actualmente se tiende a prohibir el uso del carbón, por ser el combustible que más cantidad de CO₂ produce por unidad de calor, sin embargo se usan calderas con pellas de madera como combustible.

Como combustible líquido el único en uso normal es el gasóleo. Los gaseosos son de dos tipos principales: gas natural y gases licuados de petróleo (butano y propano). Las calderas funcionan con un quemador acoplado que, mediante un ventilador, hacen la mezcla de aire y combustible adecuada, y se quema en el

hogar. Tanto con líquidos como con gaseosos, el funcionamiento de las calderas es intermitente, es decir la regulación de la potencia se hace poniendo en marcha y parando el quemador. Hay quemadores llamados modulantes que varían la potencia de la llama en función de la demanda.

También hay calderas de gas con quemadores atmosféricos, que no requieren ventilador; el gas fluye por su propia presión, sale a presión por unos inyectores finos y se mezcla con el aire por efecto venturi antes de llegar al quemador propiamente dicho. En estas calderas el quemador consiste en una cierta cantidad de candelas dispuestas en filas en un plano.

Existen aparatos unitarios por combustión, como las estufas de gas butano, llamadas estufas catalíticas. Tienen un rendimiento aceptable, pero requieren aire del exterior para la combustión y producen gran cantidad de vapor de agua como resultado (aproximadamente 1,6 litros de agua por cada kilogramo de combustible), por lo que no son demasiado aconsejables, pues añaden gran cantidad de humedad al aire ambiente. También se usan estufas unitarias de queroseno, con los mismos inconvenientes, aunque con una producción de vapor un poco menor.

➤ ***Por electricidad***

Otro sistema de obtener calor es utilizando electricidad. Y esto de dos maneras: por resistencias eléctricas, es decir aprovechando el efecto Joule, o por bomba de calor. Es raro encontrar calderas con resistencias, ya que poseen el inconveniente de generar un alto consumo de energía eléctrica.

De cualquier forma puede ser económico utilizar la electricidad mediante una bomba de calor, cuyo principio es que toma calor de una fuente exterior (fuente fría) para introducirlo en el proceso. El rendimiento de una bomba de calor es grande, compensando el precio unitario superior de la electricidad, pero depende de la temperatura de la fuente fría; cuando esta fuente es el aire del exterior y éste es muy frío, el rendimiento baja mucho.

➤ ***Otros sistemas de calentamiento***

Aunque se piensa que la energía solar puede servir para la calefacción, los inconvenientes de la instalación no compensan las ventajas: los colectores solares tienen menor rendimiento cuanto más baja es la temperatura exterior (y, por lo tanto, los días en los que más falta hace la calefacción) y además, los días más fríos del año son también los más cortos, con menos horas de soleamiento. Técnicamente puede hacerse, pero la cantidad de colectores necesaria es grande y, cuando no haga falta calefacción producirán unas importantes cantidades de calor que habrá que disipar en el ambiente o en otro uso. Una posibilidad interesante es aprovechar ese calor sobrante haciendo una acumulación estacional, que requiere unos depósitos grandes, pero es factible.

Muy interesante es el aprovechamiento de calores residuales procedentes de procesos industriales, como la producción de electricidad. También es interesante, aunque solo cuando existe en las cercanías, el aprovechamiento del calor de un acuífero caliente (energía geotérmica). Ambos sistemas requieren conductos de reparto del agua caliente (como en la calefacción urbana) y que las calefacciones de los edificios sean centralizadas colectivas. En vez de caldera, en el local técnico de cada edificio habrá un intercambiador de calor.

2.2.2 Sistema De transporte. La distribución de calor en los sistemas se hace actualmente solo de dos maneras: por agua y por aire. El vapor ya no se emplea porque es un caloportador difícil de regular (hay que hacerlo en cada radiador) y porque la temperatura que alcanza la superficie de los emisores es muy alta (alrededor de los 100[°C]) de modo que puede producir quemaduras por contacto.

➤ **Por aire**

Otro sistema de llevar el calor a los locales habitados es mediante aire. En este caso los conductos son bastante voluminosos y se hacen de distintos materiales: chapa galvanizada, paneles aglomerados de fibra de vidrio, escayola y hasta cobre. También se pueden utilizar espacios de la construcción como huecos sobre falsos cielorrasos o incluso pasillos, plenum (en estos casos solo se suele emplear para retornos).

El empleo del aire para la calefacción es casi inexcusable cuando hay también una instalación de refrigeración, que debe ser, en general, por aire. No parece lógico utilizar dos instalaciones distintas para el mismo fin: climatizar espacios. Además, una instalación de climatización por aire bien concebida resuelve otra instalación absolutamente necesaria: la de ventilación.

El aire se puede calentar directamente en el elemento productor de calor o en un aparato de tratamiento del aire (climatizador), al que se lleva el calor desde la caldera, mediante agua por tuberías adecuadas, siendo en este caso un sistema por agua y aire.

Ventajas

Solo el método de distribución que puede utilizarse para enfriar

- El aire puede filtrarse
- El aire puede humidificarse
- El aire puede deshumidificarse
- No es caro
- Los hornos son los más potentes

Desventajas

- Requieren conductos y eso ocupa espacio en las paredes
- A menudo se escuchan los abanicos del horno
- El movimiento del aire puede diseminar alérgenos
- El aire requiere de filtros y de mantenimiento regular.

➤ **Por agua y aire**

No solo se usa el reparto por agua en la calefacción clásica, sino que también se emplea en las instalaciones de climatización por aire, para llevar el calor desde las calderas hasta los climatizadores, donde se tratará el aire, que será el caloportador que llegará a los locales; es decir, hay un transporte primario por agua y otro secundario por aire.

El sistema que más apropiadamente merece el nombre de agua y aire es el que utiliza ambos caloportadores para climatizar. Efectivamente, el caudal de aire necesario para la ventilación puede ser insuficiente como caloportador, por lo que en las instalaciones es frecuente hacer una mezcla de aire exterior (ventilación) con el de retorno. En este caso, solamente se lleva a los locales el aire de ventilación y para completar la cantidad de calor requerida, otra parte se lleva por agua a emisores específicos (ventiloconvectores).

➤ **Geotérmico**

Lo más reciente en tecnología para la calefacción (y refrigeración) doméstica se llama Bomba de Calor Geotérmica (BCG). Las bombas de calor trabajan como un refrigerador que puede funcionar a la inversa. Toman el calor de una fuente y lo depositan en otro lugar. Con sistemas geotérmicos de circuito subterráneo, el calor se toma de la tierra o se deposita en ella por medio de una tubería de circuito subterráneo.

La EPA declara que una Bomba de Calor Geotérmica puede ahorrar del 30 al 70 por ciento de los costos en energía para calefacción de una vivienda y del 20 al 50 por ciento de los costos de refrigeración en comparación con los sistemas convencionales. Sin embargo, estos sistemas no son baratos.

➤ **Por agua**

El sistema de calefacción clásico (por agua caliente) utiliza como caloportador el agua, que llega por tuberías a los elementos terminales o emisores. Las tuberías pueden ser de acero negro, de cobre y, actualmente, de materiales plásticos. No debe utilizarse acero galvanizado, porque las temperaturas que alcanza el agua destruyen la protección galvánica. En una red de tuberías metálicas nunca deben mezclarse metales distintos (no solo en las tuberías, sino en los emisores), porque los más electronegativos pueden corroer a los demás. Si no hubiera más remedio, para evitarlo, deben interponerse entre metales distintos, enlaces o empalmes de material aislante eléctrico (nilón, por ejemplo).

Ventajas

- Uso eficiente de la energía
- Silencioso
- Control cerrado de la temperatura
-

Desventajas

- Las unidades base de radiación/convección deben permanecer libres de obstrucciones y eso puede significar un reto para la

colocación de los muebles y el diseño de las cortinas.

- Aumento lento de la temperatura.
- El aire acondicionado requiere una distribución de conductos por separado y otro sistema de enfriamiento.

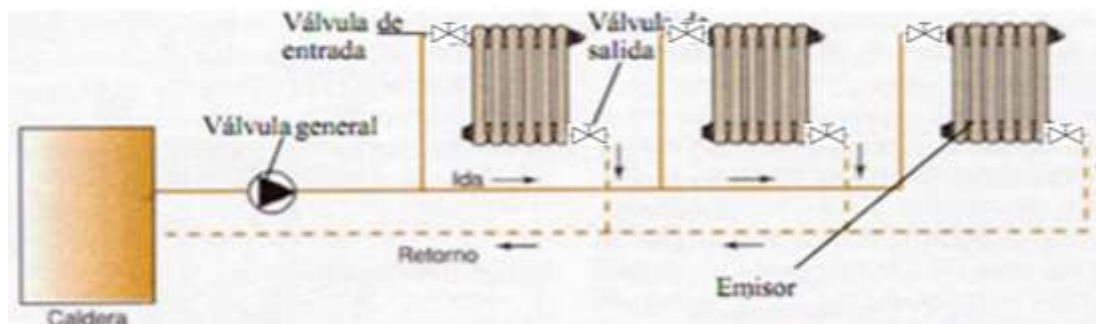
Para nuestro caso que es un sistema en el cual el fluido aportante de calor al medio es el agua se deberá tener en cuenta los aspectos del transporte de fluido por tubería como configuración y regulación por la red.

Como primer aspecto se hablara de la configuración de una red hidráulica utilizada para calefacción.

RED HIDRÓNICA.

Es el conjunto de elementos y equipos que maneja y transporta la parte fluida del sistema de calefacción, mostrada en su configuración más global en la figura 4.

Figura 4. Red hidráulico global



Los aspectos representativos de una red hidrónica son la configuración de la tubería en la red (entrega y retorno), el elemento impulsor del fluido, elementos de regulación y las unidades de transferencia.

CONFIGURACIÓN DE LA RED DE TUBERÍA

Las configuraciones de tubería de agua aquí tratadas se dividen en dos tipos: de agua que circula una sola vez y de agua recirculada. En el primero el agua pasa a través del aparato solamente una vez y es descargada (el fluido es tomado de un depósito y al pasar por la red es vertido nuevamente en el depósito). En el segundo el agua no se descarga, sino que circula en un circuito desde el aportador de calor hasta el radiador, volviendo nuevamente al aportador de calor (no existe depósito como tal, es un sistema cerrado).

En este caso para el proyecto se escogió la configuración de sistema cerrado.

Escogida la configuración de la red a utilizar se debe elegir la manera más efectiva de recolectar el fluido de la red para retornarlo al sistema de aporte de calor y así comenzar de nuevo el ciclo.

➤ Sistema de retorno de agua

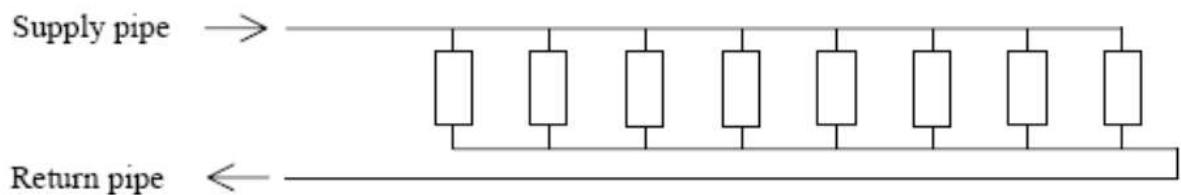
En la configuración de la red hidrónica en el retorno de agua puede usarse uno de los siguientes sistemas:

- Tubería de retorno inverso
- Tubería de retorno directo

Si las unidades tienen la misma, o casi la misma, caída de presión a través de ellas, se recomienda los sistemas de retorno inverso. Sin embargo, si las unidades tienen diferentes caídas de presión, o necesitan válvulas auxiliares (o de descarga), entonces es generalmente más económico usar retorno directo.

La tubería de retorno inverso es recomendable en la mayoría de instalaciones de sistemas cerrados. La longitud del circuito de agua en las tuberías de retorno y de suministro es la misma para todas las unidades. Como los circuitos de agua son iguales para cada unidad, la mayor ventaja de un sistema de retorno inverso consiste en que raras veces es necesario equilibrarlo, ver figura 5.

Figura 5. Tubería de retorno inverso

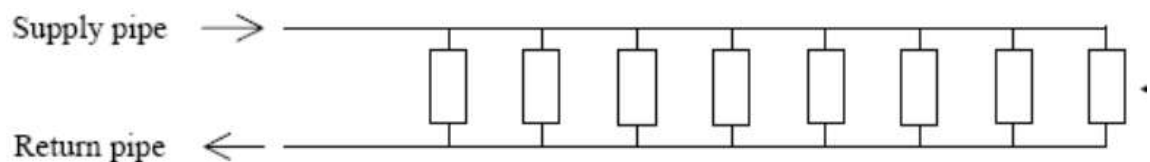


Fuente CHALMERS, civil and environmental engineering. Disponible en internet:
<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/173572/173572.pdf>

La tubería de retorno directo es necesaria en los sistemas abiertos y recomendable en algunos sistemas cerrados donde todas las unidades requieren válvulas auxiliares y tienen diferentes caídas de presión. Un ejemplo de este tipo de sistemas es el de varias unidades fan-coil (ventilador-serpentín) interconectadas y que necesitan diferentes caudales de agua, con capacidades y caídas de presión diferentes.

El sistema de tubería de retorno directo siempre es desequilibrado y exige válvulas auxiliares o bocas y elementos para medir la caída de presión al objeto. Aunque los costes de material son más bajos en este sistema, el coste de equilibrarlo podrían hacerlo menos atractivo, ver figura 6.

Figura 6. Tubería de retorno directo



Fuente CHALMERS, civil and enviromental engineering. Disponible en internet:
<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/173572/173572.pdf>

Se seleccionó la configuración de retorno directo para el proyecto ya que se manejaran caudales diferentes por cada línea de la red, lo cual hace necesario la utilización de válvulas.

Otro constituyente de la red hidrónica además de la tubería es el elemento de impulsión.

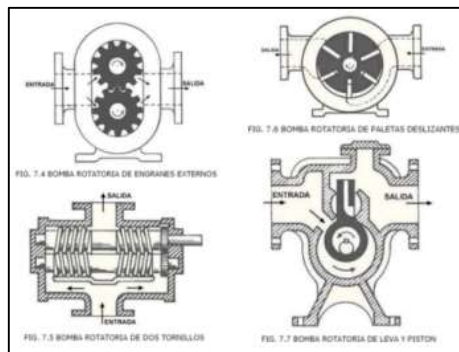
ELEMENTO DE IMPULSION

Maquinaria que aporta la energía requerida para el transporte del líquido a través de la red. Dependiendo del tipo de fluido, de las características geométricas de la red, los valores de caudal y presión requeridos en los puntos de suministro, los

subsistemas de impulsión pueden estar conformados por arreglos de bombas centrífugas o bombas de desplazamiento positivo.

Las bombas de desplazamiento positivo (Figura 7) envían paquetes de fluido a un caudal constante o variable dependiendo de la configuración de la bomba. Generalmente las bombas de desplazamiento positivo trabajan a presiones elevadas.

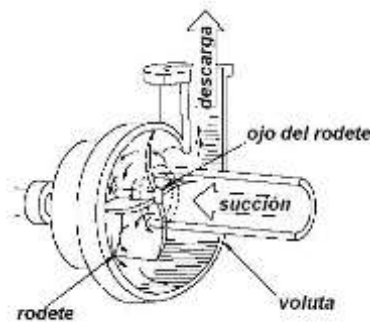
Figura 7. Bombas de desplazamiento Positivo



Fuente INGENIERIA CIVIL, Bombas de desplazamiento positivo. Disponible en internet:
<http://www.ingenierocivilinfo.com/2011/11/bombas-de-desplazamiento-positivo.html>

La bomba centrífuga figura 8, ya que es la bomba utilizada en el sistema abarcara un poco más en cuanto a información, esta clase de bombas incrementan la energía cinética de un flujo mediante la acción de una fuerza centrífuga, energía que simultáneamente convierte parcialmente en presión, mediante la reducción eficiente de la velocidad del fluido en movimiento.

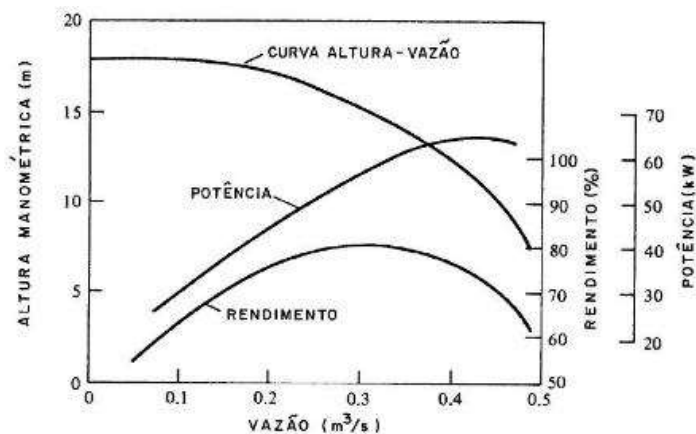
Figura 8. Bomba centrífuga.



Fuente FULL MECÁNICA, lo que hay que saber de una bomba centrífuga. Disponible en internet:
<http://www.fullmecanica.com/definiciones/b/1677-bombas-centrifugas>

En general una bomba centrífuga se caracteriza por tener una curva de operación de la forma $H = A + BQ + CQ^2$ donde A, B y C son constantes dependientes de la bomba en particular, H la cabeza de presión y Q el caudal. La gráfica de esta curva se muestra en la figura 9, en la cual tanto la presión como el caudal son variables y dependen de la instalación.

Figura 9. Curva característica de una bomba centrífuga.



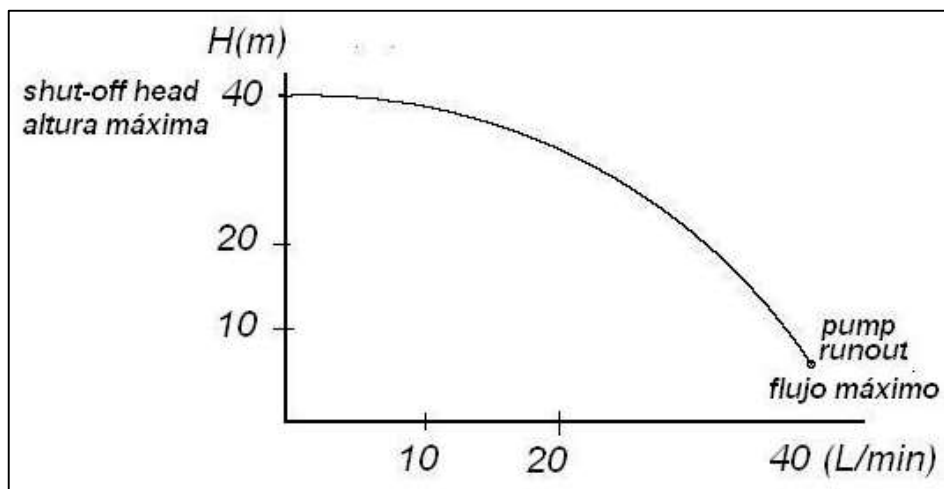
Fuente ALBANEZE Danilo. Ebah, A análise consumo energia elétrica com a instalação inversor frequência no sistema abastecimento água. Disponibl em internet: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAfntgAG/tcc-analise-consumo-energia-eletrica-com-a-instalacao-inversor-frequencia-no-sistema-abastecimento-agua-bairro-aero-rancho-campo-grande-ms-danilo-b-albaneze?part=3>

➤ **Características de la curva de la bomba**

El punto más a la derecha de la curva (Pump runout) figura 11, muestra la lectura del trabajo de la bomba a operación sin carga y con el flujo máximo que puede desarrollar la bomba sin dañarla. El punto más a la izquierda de la curva (shutoff head) figura 10, muestra la lectura del trabajo de la bomba a operación de altura de cabeza máxima con el mínimo flujo desarrollado por esta sin dañarla.

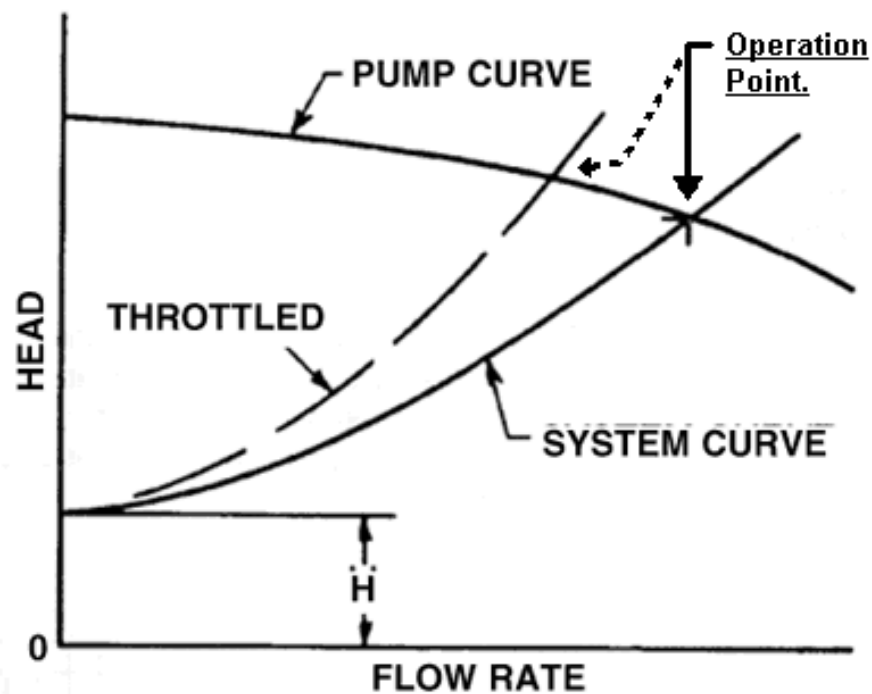
Se le llama punto de operación figura 11, a los valores de caudal y cabeza de presión que desarrolla la bomba acoplada a un sistema de tubería. Una bomba bien seleccionada, en este punto debe satisfacer los requerimientos del sistema.

Figura 10. Puntos límite de operación de una bomba.



Fuente FULL MECÁNICA, lo que hay que saber de una bomba centrífuga. Disponible en internet:
<http://www.fullmecanica.com/definiciones/b/1677-bombas-centrifugas>

Figura 11. Punto de operación sobre la curva de la bomba.



Fuente MENDOZA Felix. Monografias.com. bombas centrifugas. Aplicación, sistemas, principios fundamentales y selección. Disponible en internet: <http://www.monografias.com/trabajos36/bombas-centrifugas/bombas-centrifugas2.shtml>

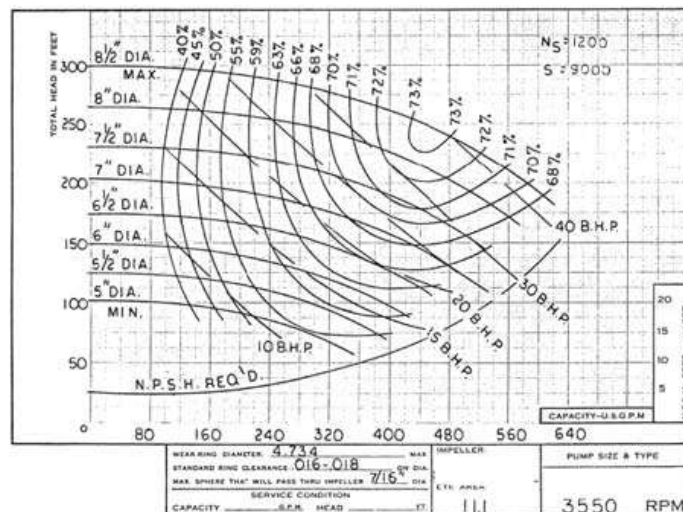
➤ **Leyes de semejanza**

Desde el análisis dimensional, se establecen las leyes de semejanza figura 12, que indican la relación funcional de los parámetros de desempeño de una bomba centrífuga: Caudal, Cabeza de presión y potencia; con la velocidad de rotación, y el diámetro del Rotor. La figura 13 muestra esta dependencia y la familia de curvas que caracterizan el desempeño de una bomba a diferentes rpm y diámetros.

Figura 12. Leyes de semejanza en bombas.

RPM: Const Rodete: var	RPM: Var Rodete: Const	RPM: Var Rodete: Var
$\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \left[\frac{D_2}{D_1}\right]^3$	$\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \left[\frac{N_2}{N_1}\right]$	$\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \left[\frac{N_2}{N_1}\right] * \left[\frac{D_2}{D_1}\right]^3$
$\frac{H_2}{H_1} = \left[\frac{D_2}{D_1}\right]^2$	$\frac{H_2}{H_1} = \left[\frac{N_2}{N_1}\right]^2$	$\frac{H_2}{H_1} = \left[\frac{N_2}{N_1} * \frac{D_2}{D_1}\right]^2$
$\frac{\dot{W}_2}{\dot{W}_1} = \left[\frac{D_2}{D_1}\right]^5$	$\frac{\dot{W}_2}{\dot{W}_1} = \left[\frac{N_2}{N_1}\right]^3$	$\frac{\dot{W}_2}{\dot{W}_1} = \left[\frac{N_2}{N_1}\right]^3 * \left[\frac{D_2}{D_1}\right]^5$

Figura 13. Curvas características de bombas (eficiencia, diámetros, potencia, NPSH Vs caudal, Cabeza Vs caudal).

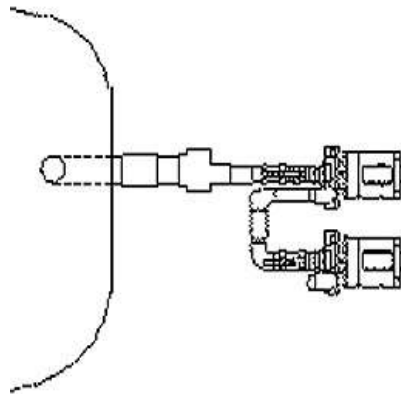


Fuente Centrifugal Applications (ANSI/HI 1.3-2000). Hidraylic Institute, 2000

➤ **Asociación de bombas centrífugas**

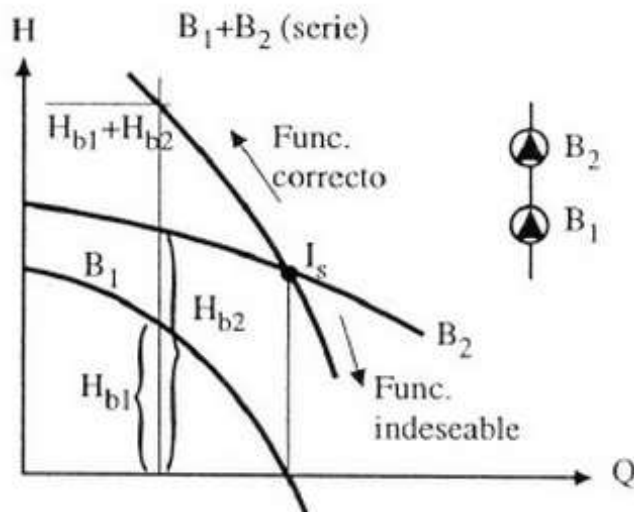
Asociación en serie: En este tipo conexión figura 14, muestra que la impulsión de una se convierte en la aspiración de la otra. Este tipo de asociación no suele ser la más común, ni la más extendida. Su aplicación recae en instalaciones con necesidad de bombeo de fluido a distintas alturas (poco corriente) y sobre todo en bombas multicelulares. Estas bombas disponen de varios rodetes instalados en serie dentro de la misma carcasa, con lo que se consiguen grandes alturas como se muestra en la figura 15.

Figura 14. Conexión de bombas en serie.



Fuente VIVARIO NATURA. Bombas y depuración. Disponible en internet:
<http://vivarionatura.blogspot.com/2011/02/bomba-y-depuracion.html>

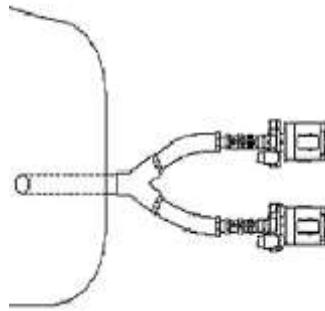
Figura 15. Curva resultante obtenida a través de la conexión de bombas en serie.



Fuente PEREZ Maariisol, ACADEMIA. Bombas en serie y paralelo. Disponible en internet:
https://www.academia.edu/6625553/Bombas_en_serie_y_paralelo

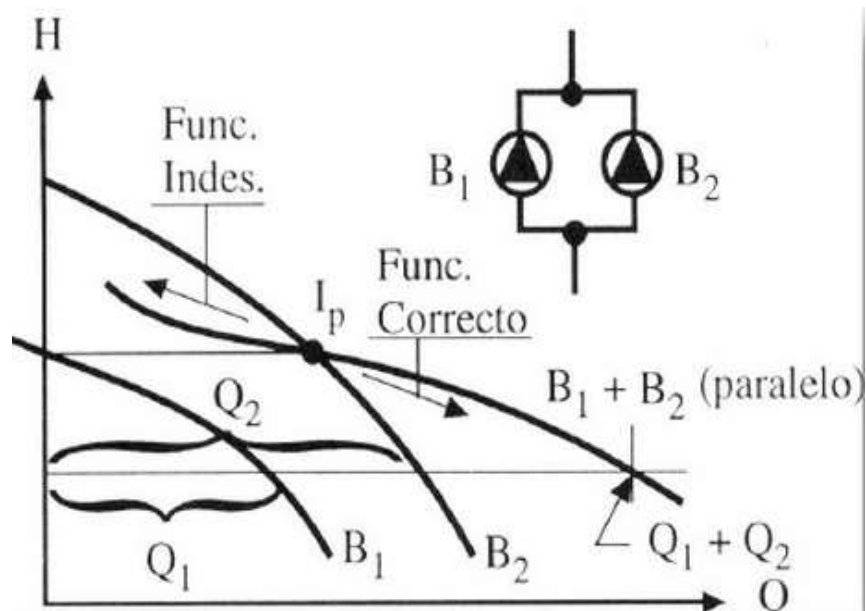
Asociación en paralelo: Este tipo de conexión figura 16, es sin duda el caso más habitual. En muchas instalaciones tenemos unas condiciones de trabajo muy marcadas, por ejemplo en el suministro de agua a una ciudad. Pero tenemos el inconveniente de una demanda fluctuante en el tiempo. Disponer de una única bomba nos haría sobredimensionarla y que trabajase en zonas poco eficientes. Será mejor solución disponer de una batería de bombas trabajando en paralelo como se muestra en la figura 17, que entren en funcionamiento de forma progresiva para atender la demanda.

Figura 16. Conexión de bombas en paralelo.



Fuente VIVARIO NATURA. Bombas y depuración. Disponible en internet:
<http://vivarionatura.blogspot.com/2011/02/bomba-y-depuracion.html>

Figura 17. Curva resultante obtenida a través de la conexión de bombas en paralelo.

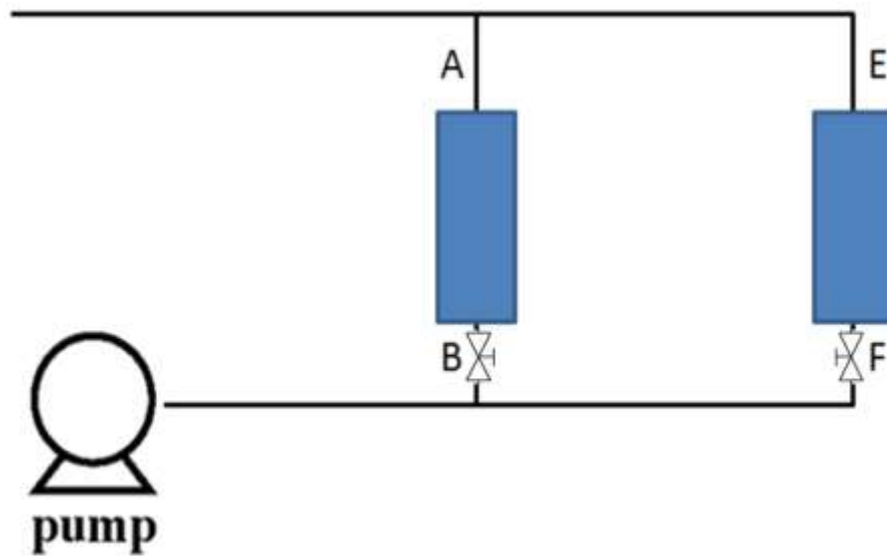


Fuente PEREZ Maariisol, ACADEMIA. Bombas en serie y paralelo. Disponible en internet:
https://www.academia.edu/6625553/Bombas_en_serie_y_paralelo

Seleccionando como elemento impulsor una bomba centrífuga y teniendo la configuración de retorno directo, se tiene una red hidráulica como se muestra en la figura 18, la cual presenta caídas de presión por los elementos constitutivos como tubería, accesorios, radiadores, válvulas

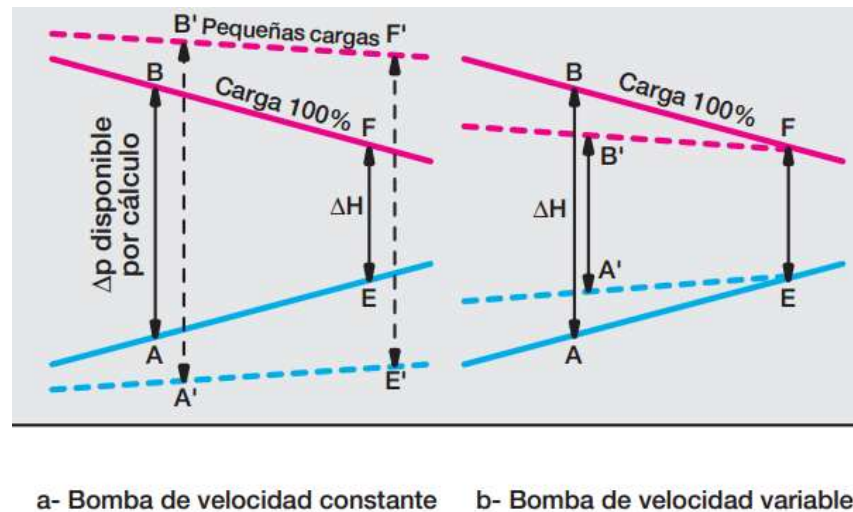
➤ ***Perfiles de presión de una red hidráulica de retorno directo***

Figura 18. Red hidráulica de retorno directo.



En la figura 18 se muestra un sistema hidráulico sencillo con retorno directo y 2 manejadoras en paralelo y las respectivas válvulas de regulación del flujo través de ellas, en la figura 19 se muestra los perfiles de presión correspondientes a los cabezales de suministro y retorno de la red hidráulica en los casos en que la bomba impulsión sea de velocidad constante (figura 19a) o de velocidad variable (figura 19b).

Figura 19. Perfiles de presión presentados en las líneas de la red hidráulica



Fuente PETITJEAN Robert. Equilibrado hidráulico con controladores de presión diferencial 3. Disponible en internet: <http://www.frioycalor.info/Comunes/EquilibradoHidraulicoPresionDiferencial.pdf>

Para el sistema con bomba de velocidad constante (figura 19a) se puede observar que la caída de presión entre los cabezales cuando las válvulas de control están totalmente abiertas, es decir al 100% de capacidad, es menor que la presentada cuando por razones de regulación (carga parcial) las válvulas de control se cierran generando una gran pérdida de presión para reducir la gran disponibilidad de presión en el cabezal de suministro debido a que la bomba por ser de velocidad constante ha aumentado su presión de descarga.

Si el sistema se alimentara con una bomba de velocidad variable (figura 19b) la presión en la descarga de la bomba se reduciría y la válvula de control no requerirá cerrarse tanto en el caso de carga parcial, para garantizar un flujo reducido a través de cada ramal, esto claramente redundaría en un menor consumo de energía del sistema.

1.2.3 Sistema de regulación de flujo. La regulación de flujo en un sistema hidráulico se puede realizar ya sea mediante válvulas o por la acción combinada de válvulas y bomba de velocidad variable.

VÁLVULA COMO ELEMENTO DE REGULACIÓN

La válvula es un dispositivo mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación (paso) de líquido o gas mediante una pieza movable que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos, figura 20.

Figura 20. Válvula



Las válvulas pueden clasificarse en función de diferentes criterios, siendo los más comunes los siguientes:

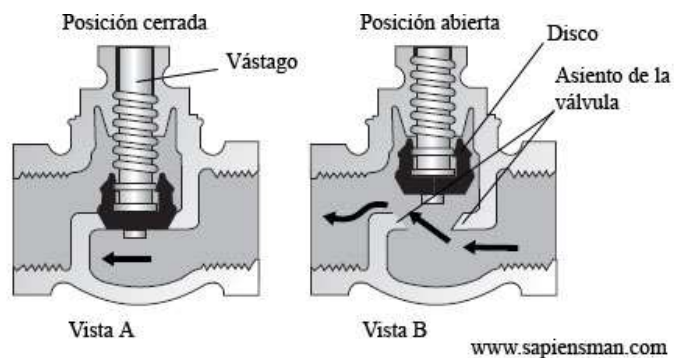
- ***Desde el punto de vista de su accionamiento***

Manuales

Válvulas de esfera: El dispositivo que permite la apertura y el cierre es una esfera, pudiendo adoptar posiciones intermedias para una apertura parcial. Se emplean en tuberías de pequeño diámetro.

Válvulas de asiento: El elemento de cierre es un disco que se asienta sobre el cuerpo de la válvula, figura 21.

Figura 21. Válvula de asiento.



Fuente SAPIENSMAN, Conceptos básicos de neumática e hidráulica. Disponible en internet:
http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica30.htm

Válvulas de mariposa: El elemento de cierre es un disco giratorio que puede ser accionado mediante una palanca o un tornillo sinfín, figura 22

Figura 22. Válvula de mariposa.



Válvulas de compuerta: La válvula se cierra mediante una compuerta accionada mediante un volante, figura 23.

Figura 23. Válvula de compuerta.



Automáticas

Válvulas hidráulicas: Se accionan hidráulicamente, pudiendo ser de dos tipos: normalmente abiertas y normalmente cerradas.

Electroválvulas: Se accionan de forma eléctrica, y son típicas de instalaciones automatizadas en las que el riego se programa por tiempos, figura 24.

Figura 24. Electroválvula



➤ ***Desde el punto de vista de la función que realizan***

Válvulas de regulación o llave de paso. Son unidades que permiten estrangular o interrumpir el paso de una corriente líquida. Un hidrante es, en definitiva, una válvula de regulación que permite derivar agua de una tubería.

Válvulas de retención: Dispositivos que consisten en una compuerta giratoria, cuya apertura se produce al paso de líquido y su cierre es por gravedad, impidiendo el retroceso. Es obligado instalar válvulas de retención en puntos estratégicos de la instalación para proteger a la red de las sobrepresiones producidas por el golpe de ariete. También a la salida del grupo motobomba, y cuando se utiliza en el riego aguas procedentes de conducciones urbanas, antes del punto de inyección de los fertilizantes, de manera que se impida el retroceso del flujo y la contaminación del agua.

La válvula de pie es un caso particular de válvula de retención que se instala en la base de la tubería de aspiración para evitar su vaciado (descebado), ya que debe estar llena de agua para su funcionamiento.

Válvulas de seguridad: Dispositivos que permiten la fuga automática de un caudal líquido para evitar un incremento de presión en la tubería sobre la presión prefijada. Básicamente constan de un elemento móvil sobre el que actúa, por un lado, la presión del agua, y sobre el otro, un resorte calibrado, de manera que la válvula se abre si es mayor la presión del agua, permitiendo la salida de una parte del caudal, lo que provoca una disminución de la presión.

Válvula reductora de presión: Es un dispositivo que produce una pérdida de carga localizada cuando la presión sobrepasa un valor dado. Este tipo de válvulas protegen a la red de sobrepresiones y permiten una presión adecuada en las derivaciones.

Válvula reguladora de caudal: Impide el paso de un caudal superior al preestablecido, manteniéndolo constante en un valor prefijado.

Válvulas de drenaje: Permiten desaguar las tuberías tras el riego, con lo que se evita la formación de depósitos de precipitados y microorganismos. Básicamente constan de un resorte que se mantiene cerrado mientras existe presión en la red.

Válvulas antidesagüe: Impiden el vaciado de la tubería a través de emisores situados en puntos bajos.

Válvula de flotador: Corta el paso de agua cuando su nivel ha alcanzado una determinada altura. Teniendo una idea de las clases de válvulas que se encuentran comercialmente ahora nos enfocaremos en las características que se deben tener

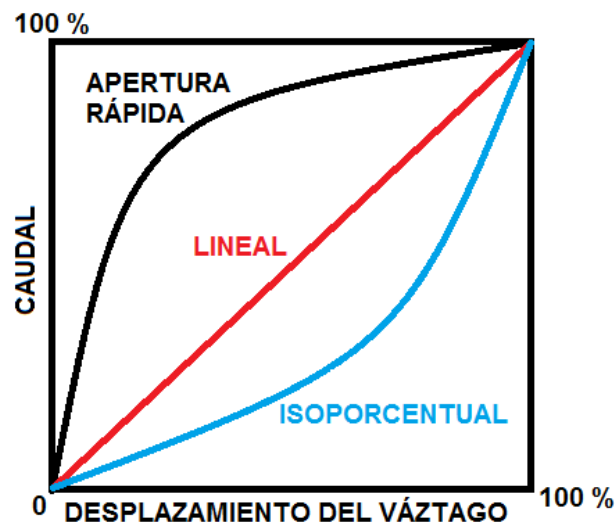
en cuenta para realizar una correcta regulación en la red, la cual es enteramente dependiente del valor de autoridad de la válvula.

CARACTERÍSTICA DE CAUDAL INHERENTE

El obturador determina la característica de caudal de la válvula; es decir, la relación que existe entre la posición del obturador y el caudal de paso,

La característica de un fluido incompresible fluyendo en condiciones de presión diferencial constante a través de la válvula se denomina *característica de caudal inherente* y se representa usualmente considerando como abscisas la carrera del obturador de la válvula y como ordenadas el porcentaje de caudal máximo bajo una presión diferencial constante, ver figura 25,

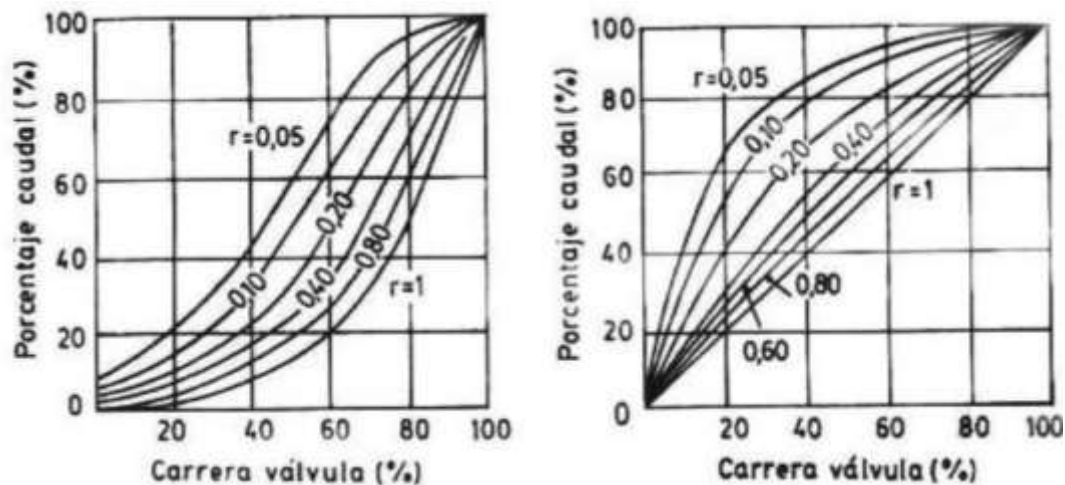
Figura 25. Curvas inherentes del comportamiento de algunas válvulas



CARACTERÍSTICA DE CAUDAL EFECTIVAS

En la práctica, la mayor parte de las válvulas trabajan en condiciones donde la presión diferencial cambia cuando varía su apertura, por lo cual la curva real que relaciona la carrera de la válvula con el caudal, se aparta de la característica de caudal inherente. Estas nuevas curvas reciben el nombre de *características de caudal efectivas*, como se observa en la figura 26a para una válvula isoporcentual y 26b una válvula lineal.

Figura 26. Curvas de características de caudal efectivas



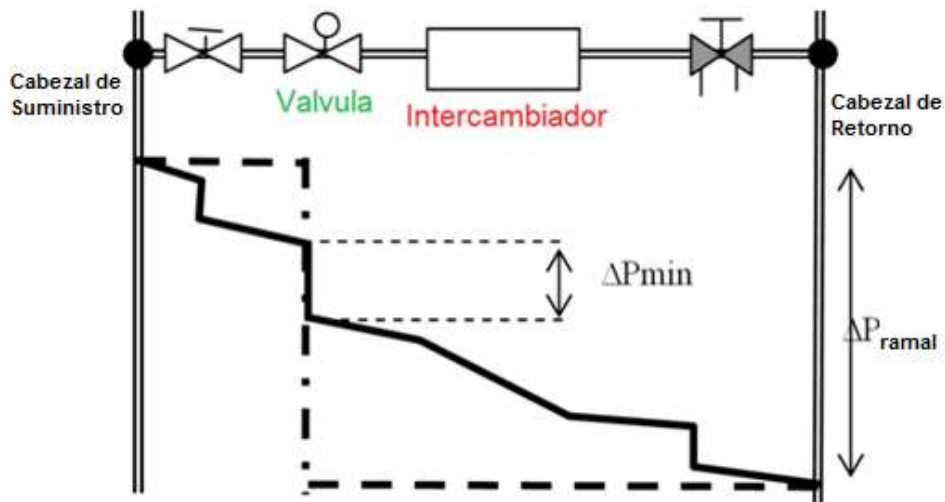
AUTORIDAD DE LA VÁLVULA DE CONTROL

En el sistema mostrado en la figura 27 cuando la válvula de regulación está totalmente abierta su efecto sobre la caída de presión del ramal que controla será mínimo (ΔP_{min}) comparado con la de los demás componentes del ramal que controla (tubería, intercambiador y otras válvulas de manejo). A medida que la válvula se va cerrando su efecto sobre la caída de presión se va aumentando hasta

que finalmente cuando se cierre totalmente ella determina toda la caída de presión a través del ramal. La autoridad (β) o rangeabilidad de la válvula (r) se define como la razón de la caída de presión en la válvula cuando ella está totalmente abierta o sea la ΔP_{min} entre la máxima caída de presión a través del ramal o sistema que ella pretende controlar,

$$r = \frac{\Delta P_{min}}{\Delta P_{ramal}} \quad (1)$$

Figura 27. Representación gráfica del concepto de autoridad



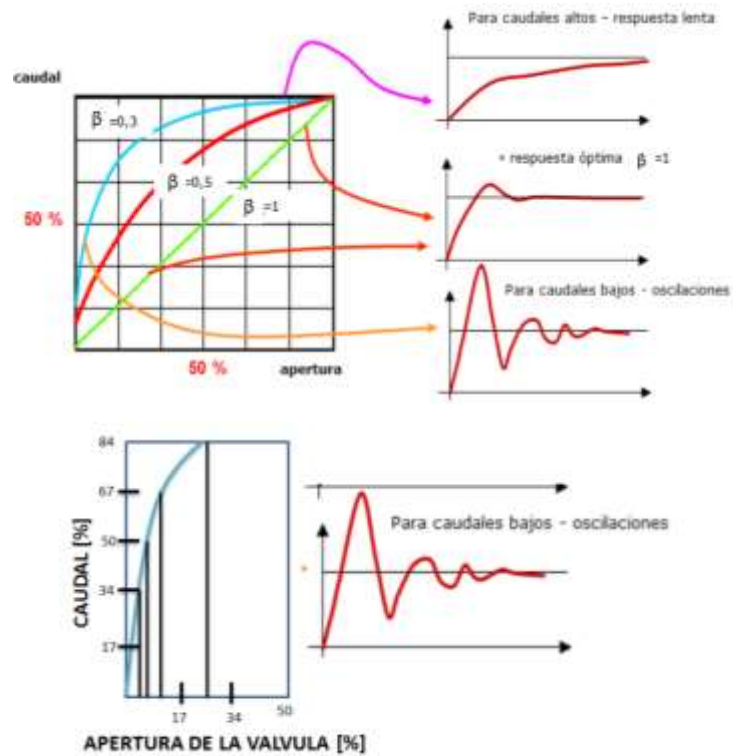
CARACTERÍSTICAS DE CONTROL Vs AUTORIDAD

La manifestación del efecto en la capacidad de control de una válvula con autoridad baja se muestra en la figura 28, para una válvula lineal.

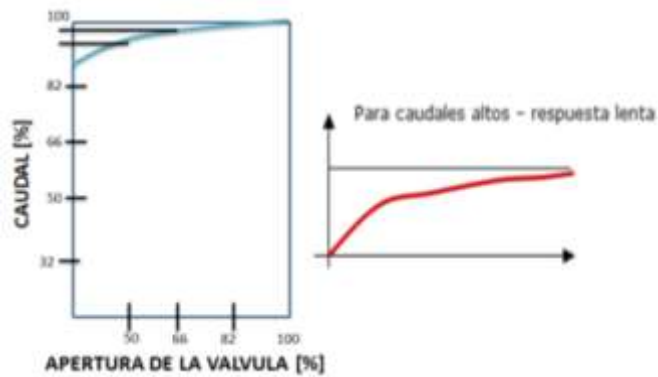
En esta se muestra que para pequeñas aperturas una válvula con $r = 0.3$ se generan grandes oscilaciones en el flujo al momento de realizar el control ya que un cambio pequeño en la apertura/cierre genera grandes cambios en el paso de caudal, figura 28a, mientras a grandes aperturas la respuesta en la variación del flujo es lenta,

como lo indica la forma aplanada de la curva apertura vs caudal, figura 28b en las zonas consideradas.

Figura 28. Característica de la válvula control Vs autoridad



(a)



(b)

Para lograr una controlabilidad adecuada en un sistema hidráulico se requiere que el valor de r sea lo más cercano a 1 lo cual quiere decir que la $\Delta P_{\max}$ soportado por la válvula represente un porcentaje alto del $\Delta P_{\text{entre_cabezales}}$, como se muestra en la figura 28, la muestra que al tender el valor de r a 1 la controlabilidad mejora hasta alcanzar la condición regulación bajo la curva característica de caudal inherente.

Si comparamos un sistema con bomba de velocidad fija, figura 19a Vs un sistema con bomba de velocidad variable, figura 19b observamos que la controlabilidad de la válvula se ve favorecida por la utilización en el sistema de un variador de velocidad aplicado a la bomba para la regulación del caudal sin incrementar el valor de $\Delta P_{\text{entre_cabezales}}$, manteniendo siempre el valor de $\Delta P_{\min}$ de la válvula como un valor cercano al del ramal y por consiguiente un valor de r cercano a 1, generando una curva característica de caudal efectivo muy cercana a la curva característica de caudal inherente.

La utilización de válvulas en sistemas hidráulicos está dada en su gran medida para regulación, pero también es clave en la distribución del fluido por la red, manteniendo fijo o variante el caudal que pasa por un tramo.

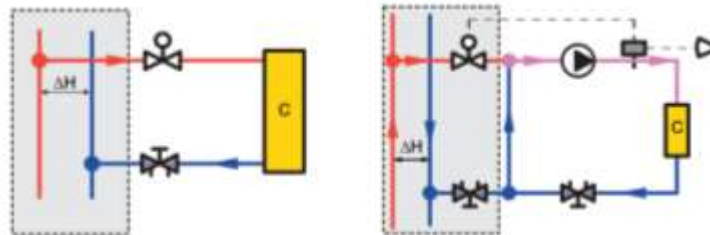
DISTRIBUCIÓN DE FLUJO

En las instalaciones la distribución de agua se puede realizar mediante caudal constante o variable. Cada tipo de distribución tiene ventajas y desventajas.

➤ CAUDAL VARIABLE

En los sistemas de distribución a caudal variable, el control se consigue principalmente mediante válvulas de control de dos vías, figura 29.

Figura 29. Sistema de distribución a caudal variable



Fuente PETITJEAN Robert. Equilibrado hidráulico con controladores de presión diferencial 3. Disponible en internet: <http://www.frioycalor.info/Comunes/EquilibradoHidraulicoPresionDiferencial.pdf>

Ventajas

- Los costes de bombeo dependen del producto de la altura de bomba por el caudal de agua. Cuanto más reducen el caudal las válvulas de control, más energía se ahorra. Esto es especialmente interesante en refrigeración, donde los costes de bombeo de distribución, con un caudal constante, representan entre el 6 y el 12% del consumo medio de energía de las enfriadoras.
- La instalación se puede diseñar con un factor de simultaneidad. Éste podría ser el motivo principal de la conversión de la distribución de caudal constante a variable, puesto que permite una expansión de la instalación mediante el uso de las mismas tuberías.
- Dado que la plena carga es infrecuente, las tuberías se pueden diseñar con pérdidas de carga superiores, lo que reduce los costes de las inversiones.

- Los caudales de producción y distribución son compatibles, lo que asegura una temperatura del agua de impulsión constante en cualquier régimen de carga. Esto es importante en las instalaciones de refrigeración esencialmente para la deshumidificación.

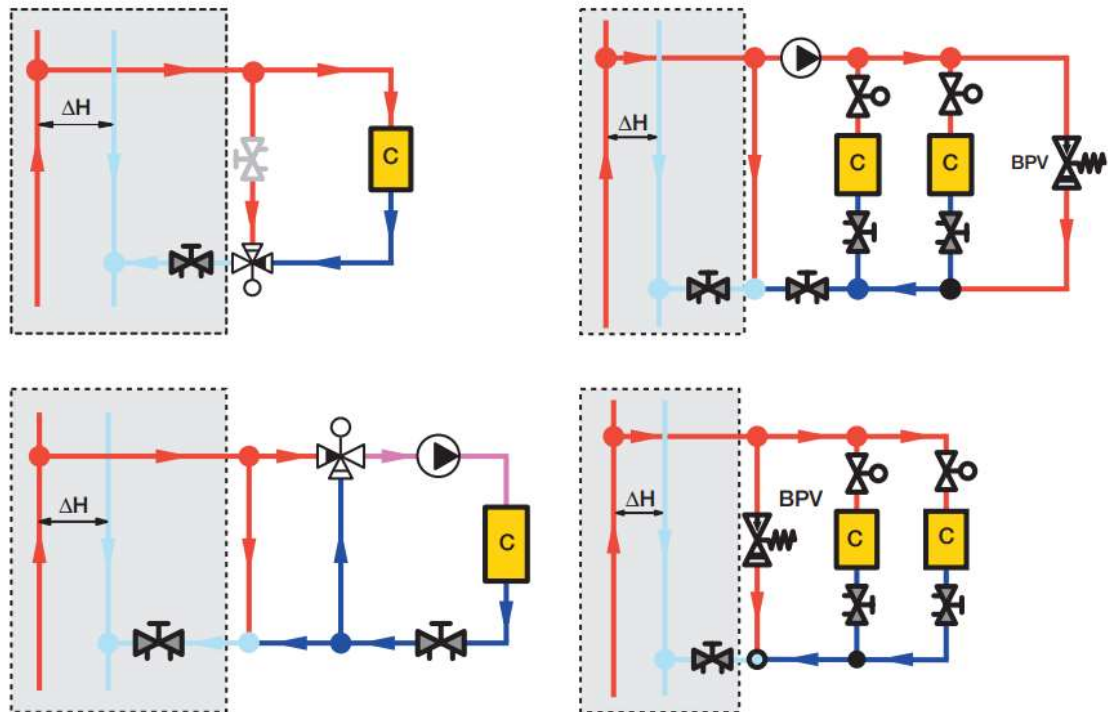
Desventajas

- Las presiones diferenciales sobre los circuitos son esencialmente variables. Esto afecta a la autoridad de la válvula de control y a la estabilidad de los bucles de control que funcionan en modo proporcional, o PI/PID.
- El dimensionado de una válvula de dos vías no es fácil, puesto que depende de la ΔH disponible para el circuito. Este valor por lo general se desconoce y es esencialmente variable.
- Los circuitos son interactivos. Cuando se cierra una válvula de control, la presión diferencial sobre otros circuitos aumenta. Las válvulas de control correspondientes se deben cerrar para compensar. Si uno o varios bucles son inestables, los problemas de control se pueden extender a todos.
- Con una carga normal del 50%, el caudal se reduce al 20% y las presiones diferenciales disponibles en todos los circuitos aumentan considerablemente, con lo que se reduce de forma significativa la autoridad de las válvulas de control, con el consiguiente riesgo de inestabilidad.
- Es exigido un caudal mínimo para proteger la bomba, lo que hace necesarias soluciones específicas.

➤ CAUDAL CONSTANTE

En los sistemas de distribución a caudal variable, el control se consigue principalmente mediante válvulas de control de dos y tres vías, figura 30.

Figura 30. Sistema de distribución a caudal constante



Fuente PETITJEAN Robert. Equilibrado hidráulico con controladores de presión diferencial 3. Disponible en internet: <http://www.frioycalor.info/Comunes/EquilibradoHidraulicoPresionDiferencial.pdf>

Ventajas

- La altura de la bomba es constante, las pérdidas de carga en las tuberías de distribución también lo son y los circuitos no resultan interactivos. En consecuencia, cada circuito recibe una presión diferencial constante y las condiciones de funcionamiento se mantienen en todas las cargas, lo que es beneficioso para los bucles de control.
- El dimensionado de las válvulas de control es fácil. Para una válvula de tres vías en un circuito de derivación se basa en la misma pérdida de carga que para la unidad de terminal, en condición de diseño. Esta pérdida de carga

suele ser bien conocida. La autoridad de la válvula de control es constante y, en algunos casos, puede estar cerca de 1.

- La temperatura del agua de impulsión es más uniforme para toda la instalación.

Desventajas

- Los costes de bombeo no disminuyen con la carga.
- El diseño de todo el sistema de distribución debe tener en cuenta que todos los terminales funcionan al máximo caudal constantemente. No es posible diseñar la instalación con un factor de simultaneidad.
- La temperatura del agua de retorno no se reduce al mínimo en calefacción ni aumenta al máximo en refrigeración. Las compañías de calefacción/refrigeración de distrito no aprecian este hecho. En calefacción, una temperatura del agua de retorno más alta no es adecuada para las calderas de condensación, ni en sistemas de cogeneración.
- Cuando hay varias unidades de producción funcionando en secuencia, los caudales de producción y distribución no son compatibles a cargas parciales. Esta diferencia genera un punto de mezcla y la temperatura del agua de impulsión no se puede mantener constante, lo que causa problemas en los sistemas de refrigeración.

Teniendo en cuenta lo abarcado en el sistema de regulación se utilizarán válvulas para la regulación de flujo que se ubicará en cada uno de los ramales de la red hidráulica se hará bajo los parámetros de caudal variable (válvula de dos vías), utilizadas en conjunto con la bomba de velocidad variable que garantice que el $\Delta P_{entre_cabe_cabezales}$ no se incremente como se mostró en la figura 19b.

Como último sistema se tiene el de transferencia de calor del fluido a la zona donde se desea crear una atmosfera de confort.

1.2.4 Sistema De transferencia de calor en la unidad terminal. Es el último sistema de una instalación hidrónica utilizada para calefacción el cual es el encargado de transferir el calor inducido por el sistema de aporte de calor (caldera), al fluido el cual es movilizado y regulado por el sistema de transporte de calor y regulación (bomba y válvulas), hasta el elemento terminal encargado de transferir el calor (intercambiador) a un espacio o zona.

Ya que este sistema debe transferir calor de un líquido a un gas el elemento que mejor lleva a cabo esa tarea es un intercambiador, que en este caso deberá ser un intercambiador que utilice como fluidos a interactuar líquido y gas.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado el intercambiador necesario será un radiador enfriado por aire, figura 31,

Figura 31. Intercambiador agua-aire



Cuyos componentes son:

- Intercambiador
- Ventilador

Estipulados todos los sistemas que conforma una instalación hidrónica de calefacción, y entendiendo el funcionamiento de cada uno de sus elementos, podremos determinar los tipos o modos de control que se aplicaran en el sistema, lo cual hace necesario implementar equipos electrónicos u eléctricos que realicen las acciones automáticas de ajuste a la maquinaria o elementos que constituyen los diversos sistemas de la instalación de calefacción según los parámetros deseados, generando un sistema agregado el cual llamaremos sistema de control, que será evaluado al igual que los demás sistemas en los capítulos de diseño conceptual y diseño en detalle .

2. DISEÑO CONCEPTUAL DEL BANCO

Cuando en un sistema de acondicionamiento de aire de un edificio las UM (Unidad Manejadora de aire) están relativamente alejadas del sistema central de enfriamiento o calentamiento, se requiere utilizar un fluido intermedio que permita el transporte de la energía hasta dichas unidades manejadoras. Normalmente el fluido más adecuado es el agua, la cual se conduce a través de un sistema de tuberías y una bomba (denominado sistema hidrónico) para garantizar que cada una de las UM reciba el flujo de agua requerido para aportar o retirar el calor al aire que finalmente llegue a los recintos a acondicionar. Se pueden lograr ahorros sustanciales de energía en este sistema cuando se trate de ajustar los requerimientos variables de flujo de agua a cada una de las UM producto de la variación de la carga térmica. En la práctica se usan distintos modos de control para suplir los requerimientos de carga térmica un sistema:

- Por bomba de velocidad fija junto a elementos como: a) *válvulas*, estas regulan el flujo máximo manejado por la bomba, cambiando su punto de operación al caudal establecido en las UM (unidades manejadoras) para cumplir con los requerimientos de carga parcial, b) *bypass*, es la desviación del flujo regulado por las válvulas por un tubo paralelo a las UM manteniendo la bomba en un punto de operación constante.
- Por bomba con velocidad variable junto a válvulas de regulación, donde la regulación del flujo requerido a cargas parciales es realizado por el cambio en las revoluciones de la bomba. Por consiguiente las válvulas solo distribuyen el caudal necesario en cada UM.

Enfocados en la búsqueda de generar un ahorro sustancial en sistemas hidráulicos utilizados para calefacción o enfriamiento se plantea este proyecto teniendo como objetivo la construcción de un banco en el cual se tenga una red hidráulica conectada a unos radiadores que es la configuración más cercana para realizar la simulación de sistema hidráulico utilizado para calefacción, el cual se evaluara en operación bajo variación de carga, aplicando un control en la bomba variando su velocidad, comparándola con el sistema utilizando la bomba en su velocidad fija realizando un contraste en los valores de potencia medidos.

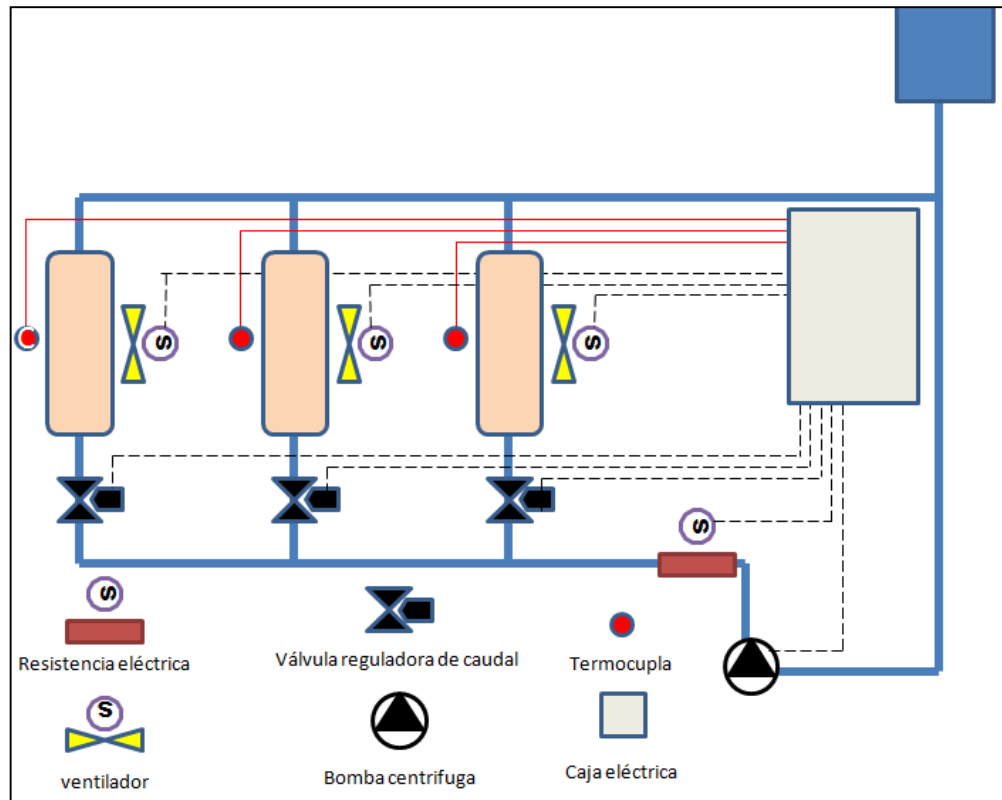
El banco construido tiene en cuenta los sistemas que conforman una instalación hidráulica para calefacción, utilizando el modo de regulación por bomba variable mencionado anteriormente, en la figura 32 se muestran la totalidad de sistemas que componen el banco.

Figura 32. Sistemas que componen el banco



El esquema general previsto para el banco se muestra en la figura 33.

Figura 33. Esquema general del banco de calefacción.



2.1 CONDICIONES DE DISEÑO DEL BANCO

El sistema desarrollado permite la evaluación comparativa del consumo de energía para el transporte de fluido a través de él en diferentes escenarios de control, en respuesta los requerimientos de carga en las zonas a condicionar, que determinan la necesidad de la regulación del flujo de agua en la UM.

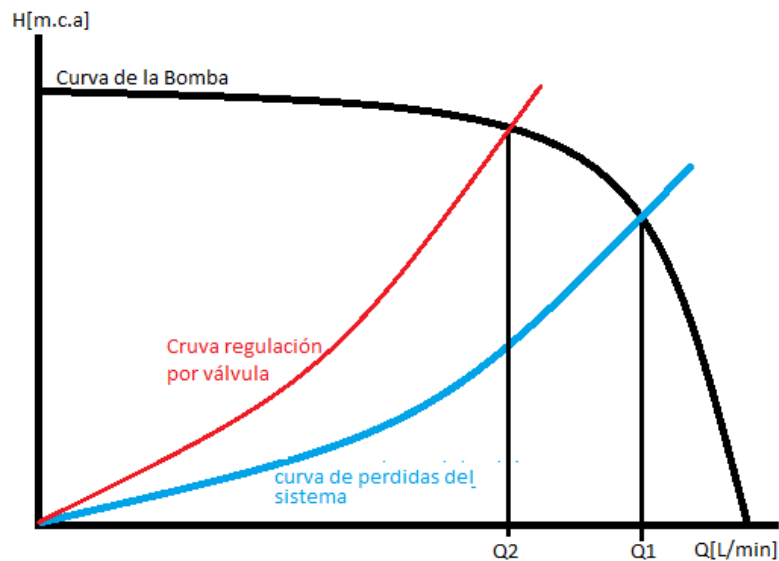
2.2 ESCENARIOS DE CONTROL

Los escenarios de control son los tres modos de operación (Referencia, RPC, RBC) en los cuales se realizarán las pruebas a cargas parciales, donde se medirá el valor de consumo de potencia de la bomba, para su comparación y determinación de una condición de ahorro energético al utilizar un variador de velocidad.

❖ *Referencia.*

Operando la bomba en su máxima velocidad y manteniéndola fija, se realiza la regulación del flujo por estrangulación de las válvulas de control en cada ramal hacia la UM de acuerdo al requerimiento impuesto por la carga, ver figura 34.

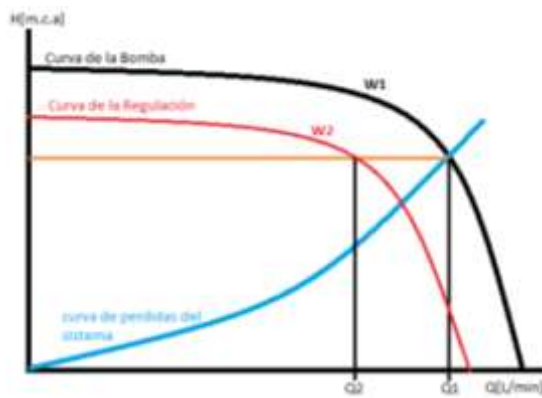
Figura 34. Regulación del sistema por válvulas con bomba de velocidad fija



❖ **RPC**

Regulación de flujo con bomba de velocidad variable manteniendo la presión de suministro constante, ver figura 35.

Figura 35. Regulación del sistema por bomba de velocidad variable con $P_{\text{suministro}}$ constante.

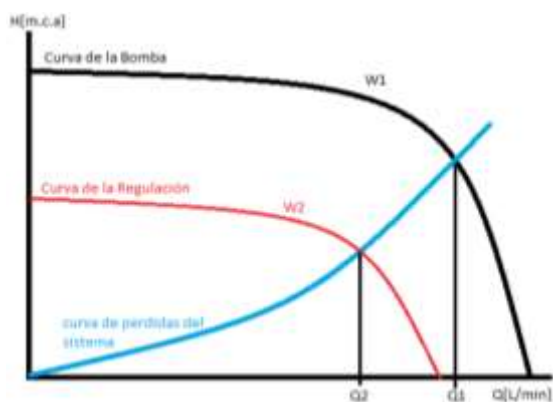


Fuente autor

❖ **RBC**

Regulación de flujo con bomba de velocidad variable siguiendo la curva de pérdidas del sistema, ver figura 36.

Figura 36. Regulación del sistema por bomba de velocidad variable siguiendo la curva de pérdidas del sistema



Los escenarios de control RPC y RBC se comparan con el escenario de referencia.

3. CARACTERISTICAS DE LA CONSTRUCCIÓN DEL BANCO

La selección y construcción del banco para la evaluación experimental de los escenarios de control (Referencia, RPC y RBC) se realizó bajo los siguientes parámetros.

3.1 JUSTIFICACIÓN DEL TAMAÑO DE LOS COMPONENTES.

La selección de los elementos que componen cada sistema del banco hidráulico de calefacción, se realizó siguiendo los factores

- ❖ Costos de los elementos
 - ❖ Espacio disponible en el laboratorio.
-
- SISTEMA DE TRANSPORTE: se utilizó una bomba PEDROLLO referencia CP 620m de 1 [HP], figura 38(a), así como un variador de velocidad para esta potencia, marca SIEMENS referencia Sinamic V20, figura 38(b), teniendo un valor en conjunto de \$1'500.000 COP, la especificación de los elementos se muestran en la tabla 1.

Tabla 2. Especificación del elemento de impulsión

COMPONENTE	DESCRIPCION	ESPECIFICACION
BOMBA	TIPO	CENTRIFUGA
	CAUDAL	100 [L/min]
	ALTURA	35 [m.c.a]
	FRECUENCIA	60[Hz]
	VOLTAJE	220[V]
	CORRIENTE	4.3[A]
COMPONENTE	DESCRIPCION	ESPEFICICAIOCN
VARIADOR DE FRECUENCIA	SINAMICS	V20
	TENSION	AC 220[V]
	CORRIENTE	16[A]
	POTENCIA	1 [HP]

Para el circuito de la red hidráulica se utilizó la configuración de retorno directo con tres UM interconectadas las cuales tienen caídas de presión diferentes, como se mostró en la figura 19, que necesitan diferentes caudales de agua a diferentes cargas impuestas sobre el sistema. La longitud del circuito se dimensiono con el objetivo de crear un sistema con suficiente pérdida para que la curva de pérdidas del sistema cruzara con la curva de la bomba anteriormente seleccionada. La tubería se seleccionó por costo material de PVC de 1[in], ya que los diámetros de succión y descarga de la bomba así como los diámetros de entrada y salida de los radiadores son de 1[in] de diámetro.

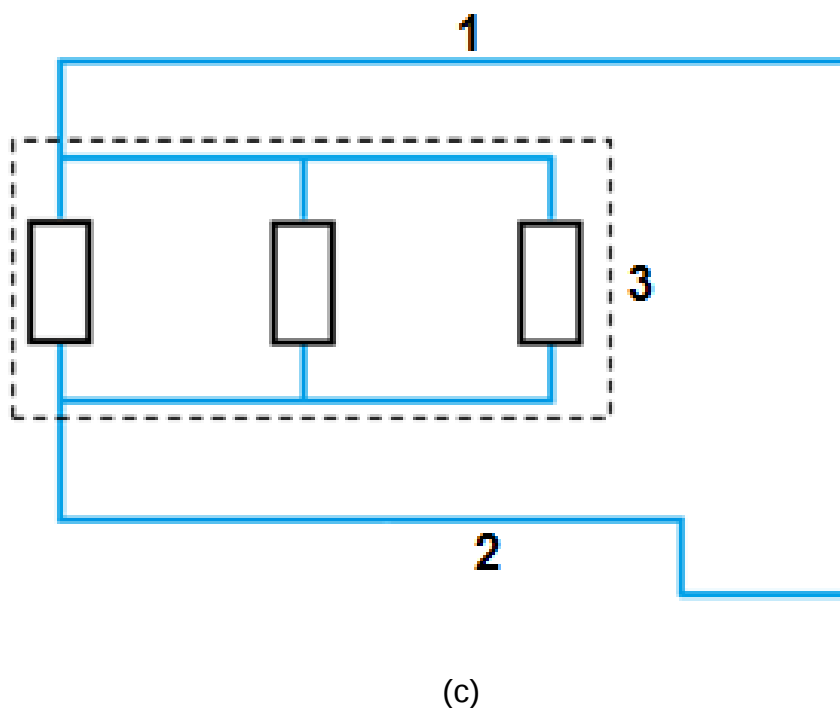
Figura 37. Elementos del sistema de transporte.



(a)



(b)



(c)

En el espacio determinado en el laboratorio de (5.5 [m] x 4[m]) se realizó La configuración de la red hidrónica mostrada en la figura 38(c) que genera una curva de pérdidas que cruza con la curva de la bomba, esta configuración necesitó de 23 metros totales de tubería junto a accesorios, distribuidos en:

- Longitud retorno (1) + longitud de descarga (2) = 14,7 [m].
- Longitud de los ramales (3) = 8,5 [m];

- 7 codos; 5 T en PVC.
- 3 válvulas de globo
- 3 válvulas de compuerta
- 3 juntas universales

Las especificaciones de la tubería se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Especificación de la tubería escogida para la red hidráulica

COMPONENTE	DESCRIPCION	ESPECIFICACION
TUBERÍA	TIPO	Alta presión
	DIAMETRO	1 [in]
	TEMP. MAX	45 [°C]
	RUGOSIDAD	Ks= 0,0015 [mm]

- SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR: se utilizó radiadores de automóvil como UM (unidad manejadora), cuyas características físicas son: Dimensiones (50[cm] X 30[cm] X 5[cm]), 32 tubos de ¼ [in], 200 aletas de espesor 0,5 [mm] flujo de aire 0,081[m³/s].
- SISTEMA DE APOORTE DE CALOR: Se seleccionó una resistencia sumergible de 15[A] con conexión a 110[V], Potencia 1650[W], cuya potencia corresponde a la condición de flujo máximo de aire en la UM, (ver determinación de la potencia del sistema de aporte de calor).

- SISTEMA DE REGULACION: para la regulación del fluido se utilizó válvulas de bola de 1[in] por su fácil manejo (ángulo de acción entre apertura y cierre 90°), figura 38.

Figura 38. Válvula de bola y motor paso a paso



- SISTEMA DE CONTROL Y MEDICION: para el control se utilizó una tarjeta ARDUINO, figura 39(a) ya que brinda una amplia gama de generación y recepción de señales análogas y digitales así como PWM (pulse width modulation), señales necesaria para el control de dispositivos de control como los relé de estado sólido, figura 39(b) que se aplican a control de los ventiladores de las UM y resistencia eléctrica.

Figura 39. Elementos de control



(a)



(b)

Para la medición de temperatura, caudal y amperaje se utilizó sensores termocuplas, figura 40(a) en la tubería de descarga y en cada una de las UM para sensar la temperatura de salida del aire, rotámetros, figura 40(b) en cada uno de los ramales del sistema para leer el valor de caudal de alimentación a las UM y un sensor de amperaje a la salida de uno de los cables de potencia del variador hacia la bomba para medir el valor de corriente consumida por la bomba en cualquier momento de la operación, figura 40(c).

Figura 40. Sensores de medición



(a)



(b)



(c)

La descripción de los elementos del sistema de control y medición se muestran en la tabla 5.

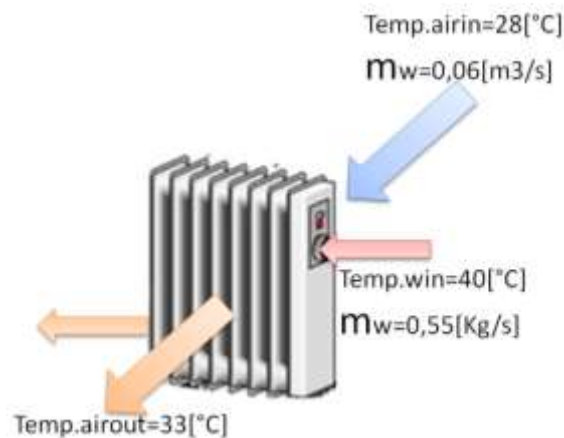
Tabla 4. Especificación de los elementos del sistema de control y medición

COMPONENTE	DESCRIPCION	ESPECIFICACION
CONTROL DE PULSOS	Tarjeta Arduino	UNO
	voltaje de operación	5 V
	voltaje de entrada	0 – 12 V
	entradas y salidas pines	18 (5 de salida PWM)
	salidas analógicas	5
	salidas digitales	13
SENSOR DE TEMPERATURA	TERMOCUPLA	TIPO J
SENSOR DE CORRIENTE	REFERENCIA	ACS71
	Voltaje de alimentación	5V
	Voltaje de salida	0 – 5V

3.2 DETERMINACIÓN DEL CALOR DISIPADO Y EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DEL RADIADOR.

Se realizó una prueba bajo los parámetros mostrados en la figura 41 realizada como escenario de carga máxima, donde se estableció de forma experimental los valores del calor disipado y el coeficiente de transferencia de la UM.

Figura 41. Parámetros de condiciones de operación para la UM a carga máxima



Para la prueba se planteó el volumen de control mostrado en la en la figura 42

Figura 42. Volumen de control de la UM



Se calcula el área de transferencia.

$$A_s = n * \pi * D * L \quad (1)$$

Dónde: n (número de tubos); D (diámetro de los tubos); L (longitud de los tubos)

$$A_s = 20 * \pi * 0.00635[m] * 0.3[m]$$

$$A_s = 0,1197[m^2]$$

Se determina el calor disipado por la UM por las siguientes ecuaciones.

Ecuaciones de transferencia de calor, lado aire

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * (T_{out} - T_{in}) = 0,0964 \left[\frac{Kg}{s} \right] * 1 \left[\frac{kJ}{Kg * ^\circ C} \right] * (33 - 28)[^\circ C]$$

$$\dot{Q} = 0.5355[kW]$$

Ecuaciones por el lado del agua

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * (T_{in} - T_{out}) \quad (3)$$

$$0, [kW] = 0,55 \left[\frac{Kg}{s} \right] * 4,186 \left[\frac{kJ}{Kg * ^\circ C} \right] * (34 - T_{out})[^\circ C]$$

$$T_{out} = 39,74[^\circ C]$$

Para hallar el coeficiente de transferencia (U) de la UM se utiliza la ecuación.

$$\dot{Q} = U * A_s * F * \Delta T_{ml} \quad (4)$$

Para esto es necesario conocer el factor de corrección F, el cual depende de la configuración geométrica del intercambiador y de las temperaturas de entrada y de salida de las corrientes de fluido caliente (agua; h) y frío (aire; c),

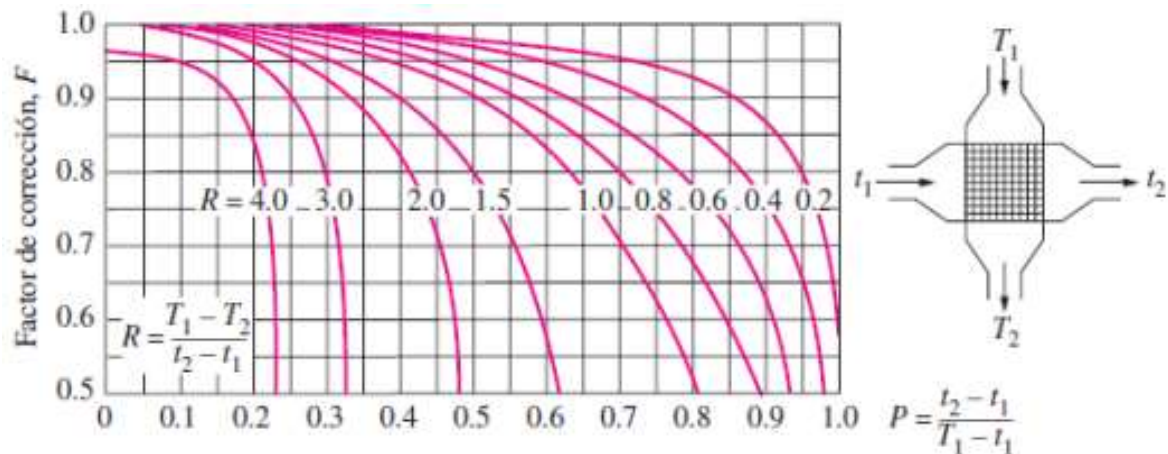
$$P = \frac{T_{h,out} - T_{h,in}}{T_{c,in} - T_{h,in}}; \quad R = \frac{T_{c,in} - T_{c,out}}{T_{h,out} - T_{h,in}} \quad (5), (6)$$

$$P = \frac{39,74 - 40}{28 - 33}; \quad R = \frac{28 - 33}{39,74 - 40}$$

$$P = 0.02 ; R = 19$$

El valor de F es tomado de la figura 43 cuyo valor es 0,9 aproximadamente.

Figura 43. Factor de corrección



Fuente cengel

Finalmente ΔT_m es la diferencia de temperatura media logarítmica, que es la forma apropiada de la diferencia de temperatura promedio que debe usarse en el análisis de los intercambiadores de calor.

$$T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (7)$$

Dónde:

$$\nabla T_1 = T_{h.in} - T_{c.out} ; \quad \nabla T_2 = T_{h.out} - T_{c.in} \quad (8), (9)$$

$$\nabla T_1 = 40 - 39,74 ; \quad \nabla T_2 = 39,74 - 28$$

Entonces

$$T_{ml} = 9,17[^\circ C]$$

Teniendo todos los factores que intervienen en la ecuación (4) se puede determinar el coeficiente de transferencia de calor de la UM en la condición de carga máxima.

$$0,5355[kW] = U\left[\frac{kW}{m^2 * ^\circ C}\right] * 0.1197[m^2] * 0,9 * 9,17[^\circ C]$$

$$U = 0,56\left[\frac{kW}{m^2 * ^\circ C}\right]$$

3.3 DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA DEL SISTEMA DE APOORTE DE CALOR

Calculado el calor disipado por la UM en caga máxima se puede determinar la potencia que debe tener el elemento encargado de aporte de calor al fluido cumpliendo con la siguiente ecuación de balance térmico.

$$\begin{aligned}Q_{Resistencia} &= 3 * Q_{UM} & (10) \\Q_{Resistencia} &= 3 * 0,5355[kW] \\Q_{Resistencia} &= 1,6065[kW]\end{aligned}$$

Donde la potencia de la resistencia seleccionada es:

$$\begin{aligned}P &= I * V & (11) \\P &= 15[A] * 110[V] = 1,650[kW]\end{aligned}$$

Realizada la selección de los elementos que componen el sistema hidráulico utilizado para calefacción, el siguiente paso es explicar el control que gobernara la operación de la bomba centrífuga bajo los escenarios descritos anteriormente.

4. FUNCIONAMIENTO DEL CONTROL REALIZADO A LA BOMBA

Para realizar el control de la operación de la bomba bajos los escenarios de control RPC y RBC, es necesario tener las curvas de la bomba y la curva de pérdidas del sistema, ya que son las curvas esenciales para realizar dos de los tres escenarios de control. Donde el escenario de control REFERENCIA se realiza recorriendo la curva de la bomba. El escenario de control RBC se realiza recorriendo la curva de pérdidas del sistema, mientras que el escenario de control RPC se realiza siguiendo la línea horizontal de presión a carga máxima.

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS CURVAS DE LA BOMBA Y CURVA DE PÉRDIDAS DEL SISTEMA

➤ curva de la bomba

Tomando los valores medidos en la operación de la bomba, mostrados en la tabla 6 realizado en el software EES, se genera una regresión matemática para obtener la ecuación de presión versus el rango de caudal de la bomba, la cual se expresará de forma general como.

$$H = A * (Frpm)^2 + B * (Frpm) * Q + C * Q^2 \quad (12)$$

Donde el factor Frpm es la relación entre las Rpm de trabajo y las Rpm de la bomba, expresada como.

$$Frpm = \frac{Rpm_{trabajo}}{Rpm_{bomba}} \quad (13)$$

En el caso de las bombas de velocidad fija donde su velocidad de operación se mantiene constante el valor de Rpm de trabajo es también el valor de Rpm de la bomba, lo que da valor para el factor Frpm de 1.

Por lo tanto para hallar la curva de la bomba se utiliza la ecuación (12) con la consideración de bomba de velocidad fija cuya ecuación será.

$$H = A + B * Q + C * Q^2 \quad (14)$$

Generando la regresión se obtiene las constantes de la ecuación de la bomba como:

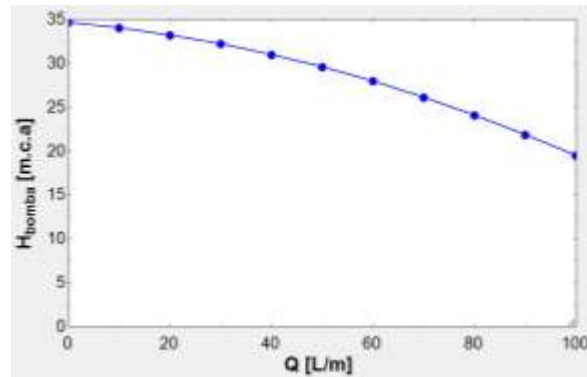
$$H_{bomba} = 3,46636364E + 01 - 5,20000000E - 02 * Q - 1,00000000E - 03 * Q^2$$

Tabla 5. Datos obtenidos en la medición de la bomba PEDROLLO CP 620m

1	Q	2	H
	0		35
	10		34
	20		33
	30		32
	40		30,7
	50		29,5
	60		28
	70		26,5
	80		24,5
	90		22
	100		19

Ingresando los valores del rango de caudal manejado por la bomba se obtiene la curva de la bomba Presión [m.c.a] Vs Caudal [L/min] mostrada en la figura 44.

Figura 44. Curva de la bomba



Realizando el anterior procedimiento a la tabla 7, donde se muestran los valores de la curva de la eficiencia (anexo C), se obtiene la ecuación de eficiencia de la bomba, la cual se expresara de forma

$$Efi = A * Q + B * Q^2. \quad (15)$$

Tabla 6. Datos obtenidos en la curva de eficiencia bomba PEDROLLO CP 620m

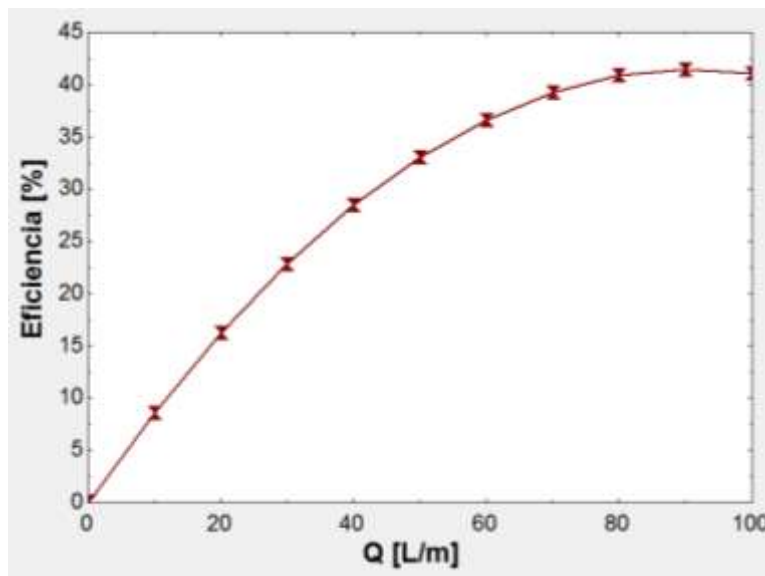
1	Q	2	Eficiencia
	10		11
	20		17
	30		23
	40		28
	50		32,5
	60		36
	70		39
	80		41
	90		42
	100		41

Generando la regresión se obtienen las constantes de la ecuación de eficiencia de la bomba como:

$$Efi = 9,11223074E - 01 * Q - 5,00730194E - 03 * Q^2$$

Ingresando los valores del rango de caudales se obtiene la curva de eficiencia de la bomba, eficiencia [porcentaje] Vs caudal [L/min] mostrada en la figura 45.

Figura 45. Curva de eficiencia

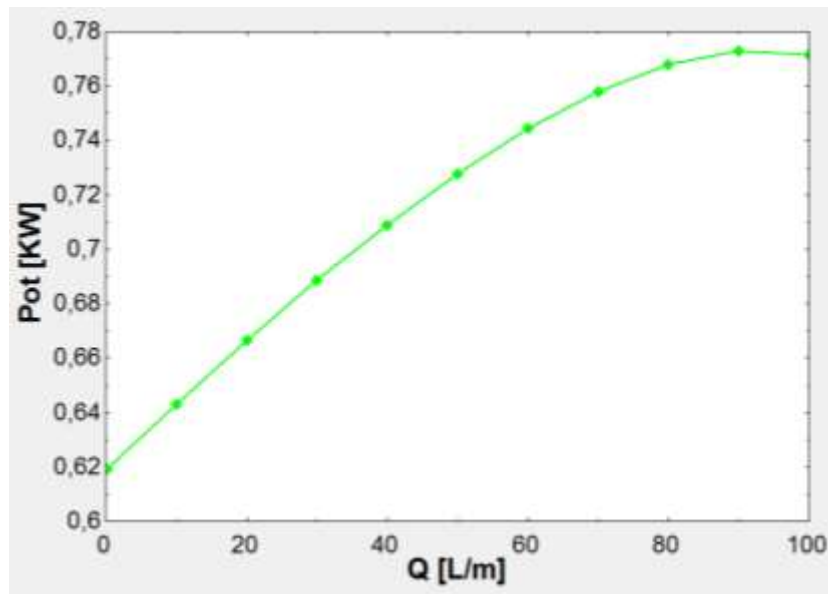


Teniendo las ecuaciones que describen la altura alcanzada junto a la eficiencia de la bomba y el valor del caudal a trabajar se puede obtener el valor de potencia consumida por la máquina en cualquier punto.

$$Pot = \frac{\gamma * H * Q}{\eta} \quad (16)$$

Graficando los valores de potencia respectivos a los valores de caudal entregados por la bomba se obtiene la curva de Potencia [Kw] Vs Caudal [L/min] mostrada en la figura 46.

Figura 46. Potencia de la bomba



➤ **determinación de las curvas a distintas revoluciones**

Determinando que el valor del rodete permanecerá constante, y la ecuación (12)

$$H = A * (Frpm)^2 + B * Q * (Frpm) + C * Q^2$$

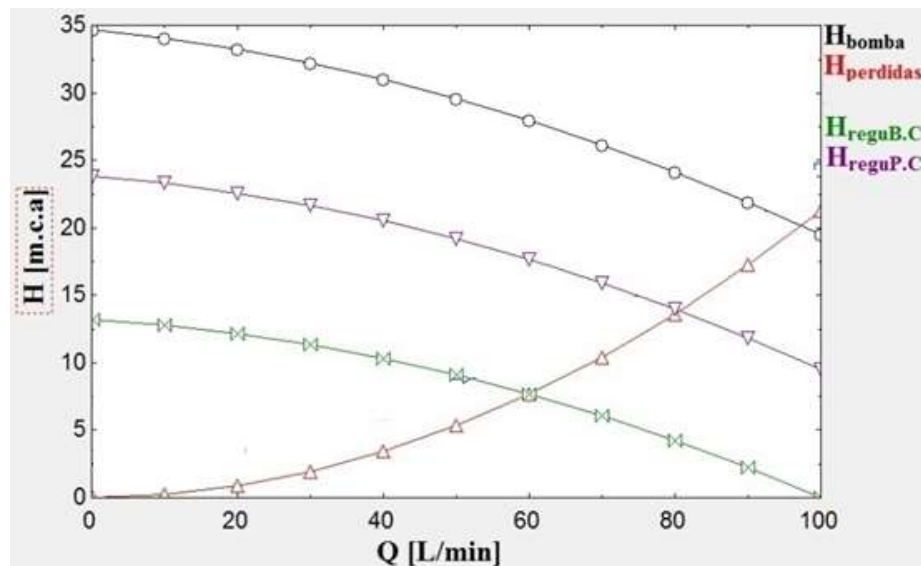
Se determina el valor del factor Frpm, con los datos adquiridos en la regulación a carga parcial como caudal de la carga parcial (Q) y presión a la carga parcial (H), despejando de la ecuación (13) el término RPM_{rabajo}

$$Frpm = \frac{Rpm_{trabajo}}{Rpm_{bomba}}$$

Donde el término de ($Rpm_{trabajo}$) es la revolución a la cual la bomba operar para cumplir con el control de la regulación.

En la figura 47 se muestran la curva de la bomba y las nuevas curvas de trabajo de la bomba establecida por los modos de regulación RPC y RBC con un flujo de 60 L/min].

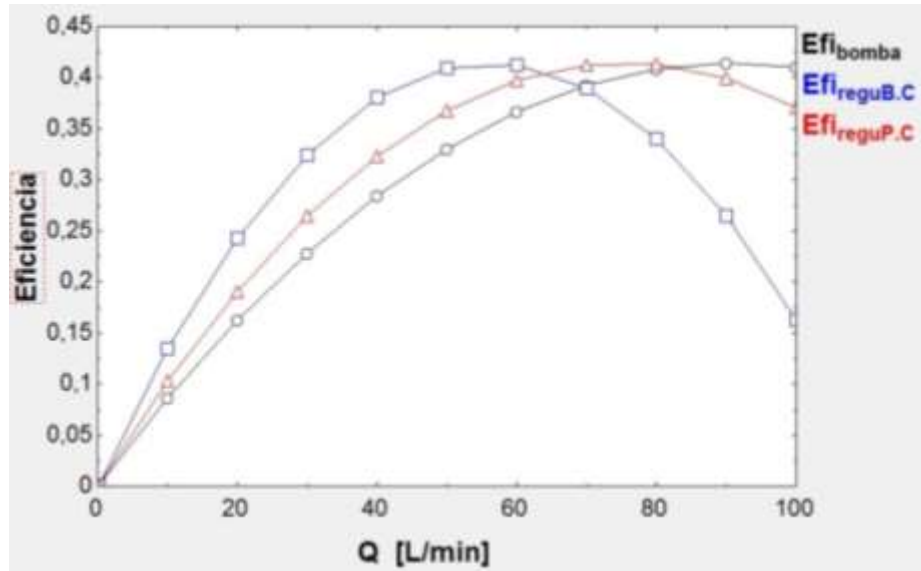
Figura 47. Generación de las curvas de regulación del sistema para un número de caudal dado.



La ecuación de eficiencia describa bajo el cambio de las Rpm de trabajo por los modos de regulación (RBC en azul, RPC en rojo) cambiará a:

$$Efi = A * \left(\frac{Q}{Frpm} \right) + B * \left(\frac{Q}{Frpm} \right)^2 \quad (17)$$

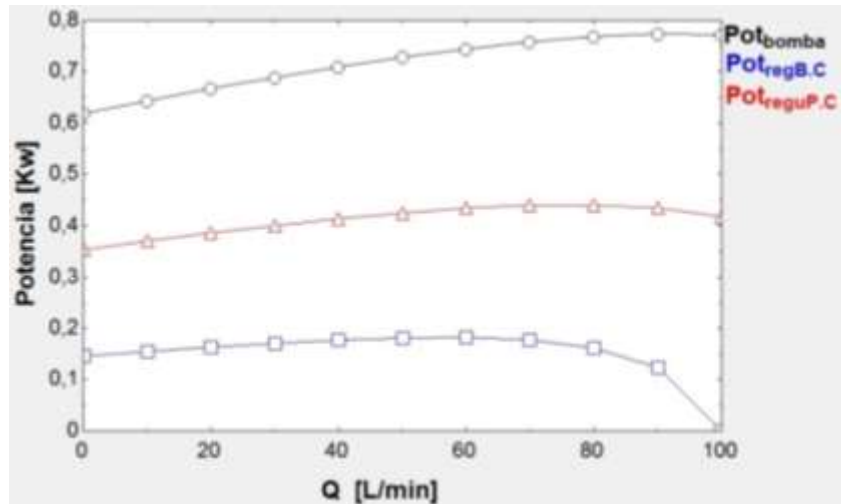
Figura 48. Generación de la nueva curva de eficiencia obtenida por la variación de las Rpm.



Finalmente el valor de potencia es determinado por el nuevo valor de caudal y presión así como de eficiencia manejado por la regulación, será:

$$Pot = \frac{\gamma * H * Q}{\eta_{regulacion}} \quad (18)$$

Figura 49. Generación de la nueva curva de potencia obtenida por la variación de las Rpm.



➤ **Curva de pérdidas del sistema**

Recopilando la información anteriormente mencionada se obtiene:

- Caudal máximo manejado por la bomba = 100 [L/m]
- Caudal máximo utilizado en el banco = 100 [L/m]
- Caudal máximo utilizado por ramal = 33 [L/m]
- Longitud de los ramales = 8,5 [m]; Longitud succión y descarga = 14,7 [m]
- Diámetros de tubería = 1 [in]; Material de la tubería (PVC para presión)
- Rugosidad del PVC $K_s = 0,0015$ [mm]

Los caculos en detalle se realizaron en el software EES y son mostrados en el anexo CALCULOS, así como simulados en el software PIPE FLOW EXPERT.

Calculo del número de Reynolds.

Tubería de succión y descarga

$$Re = \frac{4*Q}{\pi*D*v} \quad (19)$$

$$Re = 78263$$

Tubería en los ramales

$$Rer = \frac{4*\frac{Q}{3}}{\pi*D*v} \quad (20)$$

$$Re = 26088$$

Ecuación de Swamee-Jain

Para flujo turbulento: $5000 < Re < 1E8$, Restricción: $1E-6 < Ks/D < 1e-2$

Tubería de succión y descarga

$$f = \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{Ks}{D^{3,7}} + \frac{5,74}{Re_{respectivo}^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (21)$$

$$fl = 0,01908$$

Tubería en los ramales

$$fr = \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{Ks}{D^{3,7}} + \frac{5,74}{Re_{respectivo}^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (22)$$

$$fr = 0,02432$$

Perdidas por fricción y pérdidas menores en la tubería

Tubería de succión y descarga

$$h_{fsl} = 8 * fl * L_{tramo} \frac{Q_{respectivo}}{\pi^2 * D^5 * g} \quad (23)$$

$$h_{fsl} = 3,436$$

Tubería de en los ramales

$$h_{fsr} = 8 * fr * L_{tramo} \frac{Q_{respectivo}}{\pi^2 * D^5 * g} \quad (24)$$

$$h_{fsr} = 0,2813$$

Factor de fricción a total turbulencia

$$f_T = \left[\frac{\frac{1}{0,86}}{\ln\left(\frac{K_S}{D^{*3,7}}\right)} \right]^2 \quad (25)$$

$$f_T = 0,01086$$

Constante de pérdida

Utilizando las tablas del libro de fluidos de CRANE (anexo Q)

Para los valores de 7 codos; 5 T; 3 válvulas de bola; 3 válvulas de compuerta y globo

$$K_m = \sum \text{accesorios}; \quad K_{mr} = \sum \text{accesorios} + \sum \text{radiadores}$$

Tubería de succión y descarga

$$h_{msl} = km_{respectivo} * \frac{4^2 * Q_{respectivo}^2}{\pi^2 * D^4 * 2g} \quad (26)$$

$$h_{msl} = 1,477$$

Tubería en el ramal

$$h_{msr} = km_{respectivo} * \frac{4^2 * Q_{respectivo}^2}{\pi^2 * D^4 * 2g} \quad (27)$$

$$h_{msr} = 1,521$$

➤ *Curva de pérdidas por tubería y accesorios está dada por la ecuación*

$$H_p = C_s + \left[\sum \left(f * \frac{L}{D} \right) + \sum K_m \right] * \frac{Q^2}{2g * A^2} \quad (28)$$

Carga estática C_s [m]; Área de tubería A [m^2]

$$H_p = 24,13[m. c. a]$$

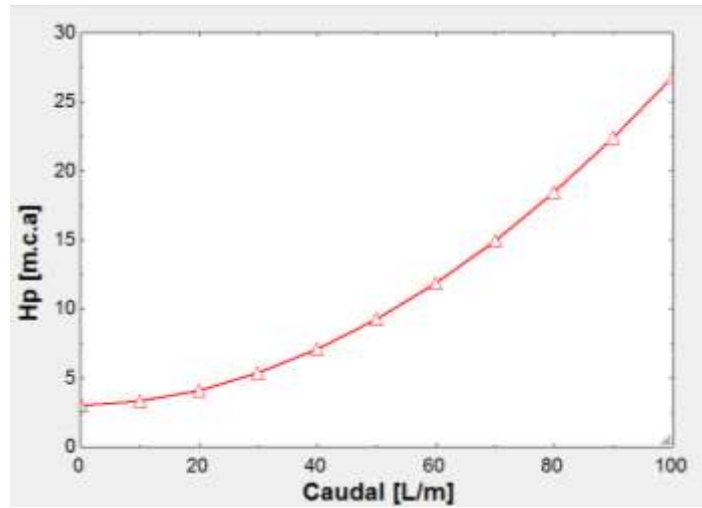
Teniendo el valor de presión alcanzada por la curva del sistema cuando se tiene un caudal de 100[L/min], se realiza el anterior cálculo para el rango de caudal manejado por la bomba obtenido la curva de pérdidas del sistema, realizando una regresión en el software EES se tiene la curva de perdidas mostrada en la figura 50.

Realizada la regresión se obtiene que la ecuación de la curva de perdidas

$$H_{p(Q)} = 1.94646137E - 03 * (Q^2); [m. c. a]$$

El cálculo en detalle de las características de la bomba junto a los cálculos de la curva de perdidas es mostrado en el anexo A

Figura 50. Curva de pérdidas del sistema



Fuente autor

Teniendo en cuenta los modos de operación RPC (Regulación a Presión Constante) y RBC (Regulación bajo la curva) se realizó el siguiente procedimiento para establecer el valor de la RPM de cada regulación para la operación de la bomba.

5. EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA HIDRÁULICA DEL SISTEMA HIDRÓNICO BAJO DIFERENTES ESCENARIOS DE CONTROL.

La evaluación del consumo de energía hidráulica de un sistema hidráulico en cada condición de operación está determinada por el conocimiento del caudal total de agua caliente (Q_{carga}) que debe enviarse a todas las UM para cumplir con los requerimientos térmicos de cada zona a acondicionar, además del conocimiento de la curva característica de la bomba $H=f(\text{rpm}, Q)$ y de la curva del sistema $H=f(Q)$.

Existen 3 maneras para determinar el valor del caudal total de agua que se emplea bajo cargas parciales:

1. modelo del sistema
2. medición de potencia consumida
3. experimentalmente

MODELADO DEL SISTEMA: realizando un modelo térmico en la UM donde se aplique de las ecuaciones de balance térmico y por despeje se estipule el valor del flujo de agua necesario, como se muestra en la figura 51.

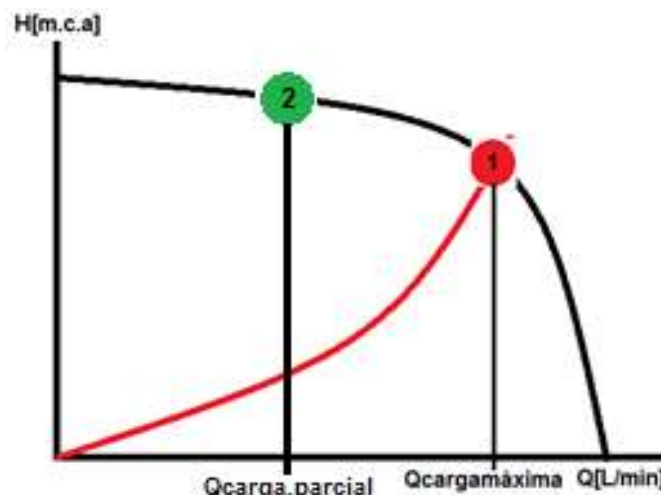
Figura 51. Modelo aplicado a la UM



Sumando los flujos requeridos por las UM obteniendo el valor de caudal a carga parcial al que debe operar la bomba.

MEDICIÓN DE LA POTENCIA CONSUMIDA: Dado que la potencia consumida por una bomba se puede expresar como una función de la RPM del motor de la bomba y el caudal $POT=f(RPM, Q)$, la medición de la potencia consumida en cada condición de operación permitirá mediante el uso de la ecuación anterior y las RPM actuales de la bomba determinar el caudal que se está moviendo en esa condición.

Figura 52. Calculo del caudal manejado por la lectura de potencia en una bomba

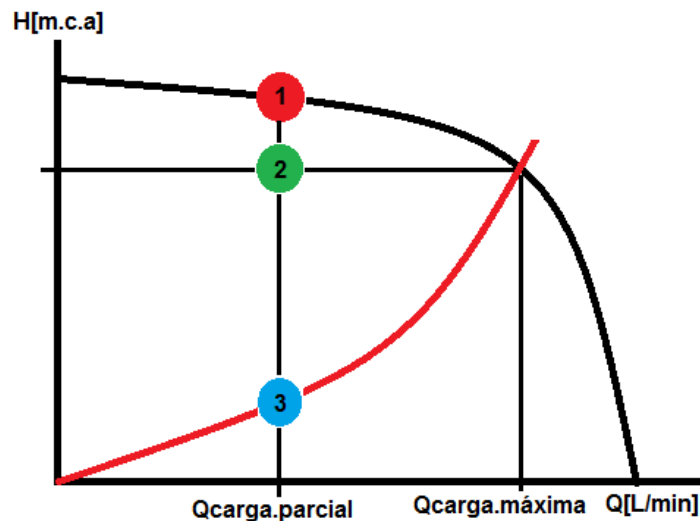


Por ejemplo, ver figura 52. El sistema se encuentra operando a capacidad total ósea con el máximo caudal manejado por la bomba (punto 1), donde su presión será P_1 , su potencia será Pot_1 , y caudal será $Q_{máx}$, al realizarse una regulación en el flujo de la bomba debido a cambios generados por el cambio de carga térmica en uno de las zonas, el sistema cambiara su punto de operación al (punto 2), donde tendrá un nuevo valor de potencia Pot_2 a las mismas RPM, se puede estipular el valor del

caudal Q_{parcial} al cual está trabajando la bomba, como se muestra en la siguiente figura.

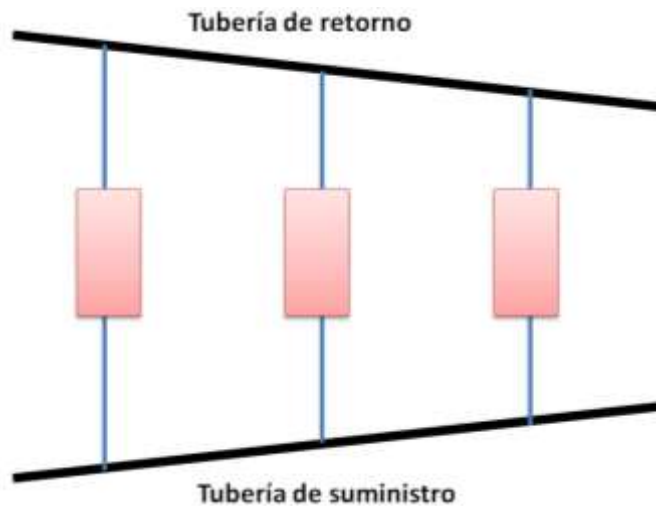
EXPERIMENTAL: dado que el objetivo del proyecto es claramente enfocado en el control del sistema hidráulico, se puede establecer cualquier valor de caudal que se quiera evaluar como simulación del cambio de caudal producto de las regulaciones del flujo en las UM bajo cambios en la carga térmica en las zonas. Donde se obtendrá el valor de potencia de la bomba en los distintos puntos de operación regidos bajo los escenarios de control REFERENCIA (punto 1), RPC (punto 2), RBC (punto 3), como se muestra en la figura 53.

Figura 53. Lectura de la potencia de la bomba según el escenario de control



NOTA: en el sistema hidráulicos de retorno directo empleado en el proyecto se tiene que la caída de presión en los ramales donde se encuentran las UM tiene el siguiente perfil, ver figura 54, como se mencionó en el encabezado *perfiles de presión de una red hidráulica de retorno directo* con la figura 19.

Figura 54. Perfiles de presión en las UM



En el cual una regulación hecha en alguno de los ramales repercutirá en el flujo de los otros, provocando un cambio en la apertura/cierre de las válvulas en los ramales no regulados para equilibrar el sistema a los valores de caudal estipulados por cada UM. Este problema tiene un mayor impacto cuando se utiliza bombas de velocidad fija que en nuestro caso es el escenario de REFERENCIA.

Abordados todos los temas sobre construcción y detalle de los elementos del banco hidráulico utilizado para calefacción se procede a explicar la interfaz desarrollada en el software LABVIEW de la National Instrument para el control y adquisición de datos.

6. INTERFAZ

Para visualizar los datos de las prueba en la interfaz creada para el proyecto es necesario adquirir datos por medio de instrumentos que puedan traducir las señales eléctricas generadas por los sensores a valores numéricos los cuales puedan ser mostrados, archivados y sirvan como información para generar respuestas por medio de señales eléctricas a dispositivos utilizados para el control de elementos que conforman los diversos sistemas. A continuación se nombran los dispositivos de hardware utilizados en la adquisición de datos.

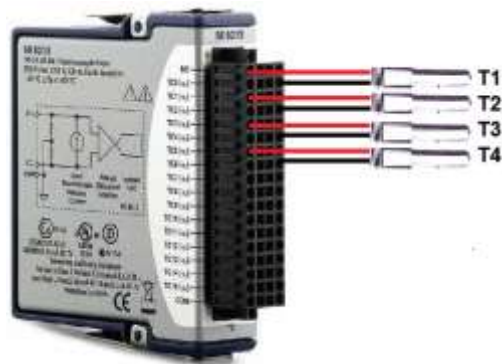
➤ **ADQUISICION DE DATOS**

La adquisición de datos y generación de señales para el control es realizada por los siguientes dispositivos:

- ❖ Tarjeta arduino mediante cable USB
- ❖ Módulos de la National Instrument C-RIO, 9211 (módulo de termocuplas), 9263 (módulo de salidas análogas) conectados a un chasis, el cual atreves de un cable LAN enlaza el hardware (chasis + módulos) con el software (LABVIEW)

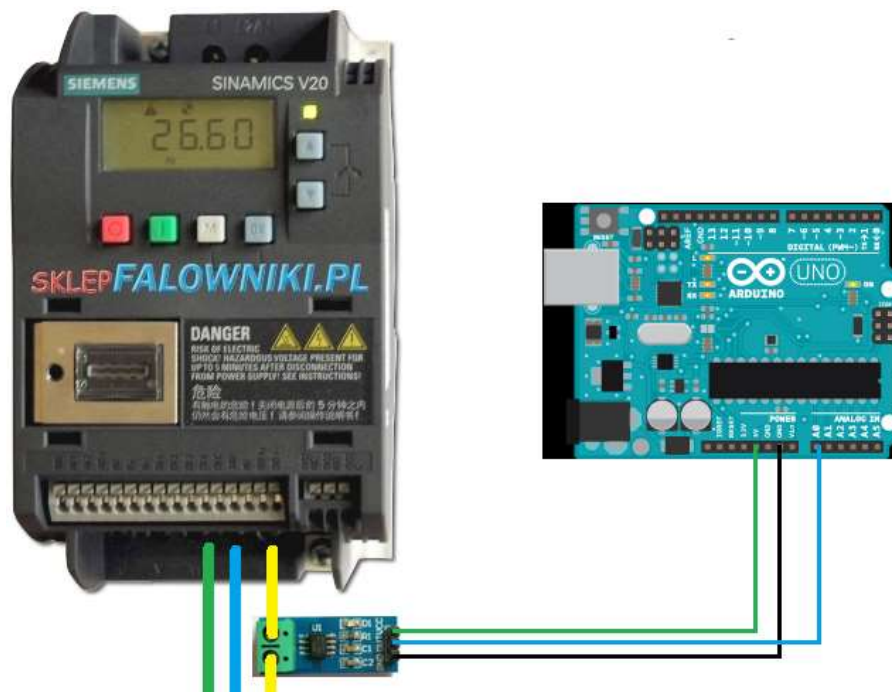
La adquisición de los datos de temperatura T1 (temperatura de entrada del agua), T2, T3, T4 (temperaturas de las zonas), es realizada por medio del módulo 9211, la conexión de las termocuplas al módulo se muestra en la figura 55.

Figura 55. Modulo CRIO 9211 para la lectura de termocuplas



La adquisición del valor de corriente consumida por la bomba se realizó por medio del sensor ACS71, cuya señal de salida es un valor de voltaje de 0 a 5[V], la conexión del sensor con la tarjeta Arduino se muestra en la figura 56.

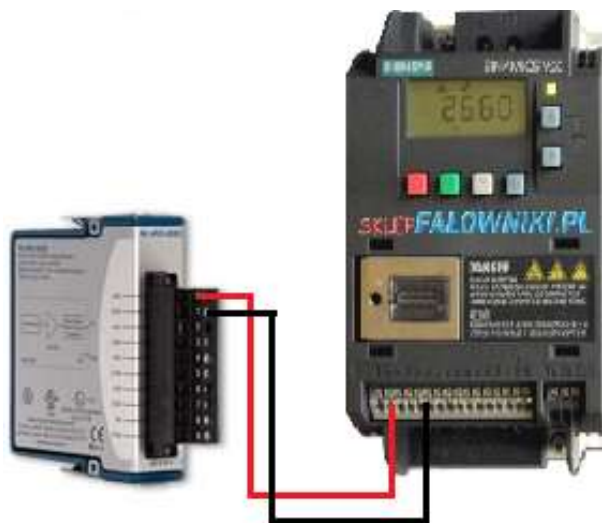
Figura 56. Adquisición del valor de corriente



➤ SEÑALES DE CONTROL

El módulo 9263 de salidas análogas genera una señal de voltaje (0 -10[V]) entre sus pines análogos y sus pines COM, voltaje que actúa como señal de control aplicada al variador de velocidad entre su pin de entrada análoga A1 y el pin 0[V] para modificar el valor de frecuencia a la cual trabaja la bomba según los escenarios de control, la conexión del módulo 9263 con variador de velocidad se muestra en la figura 57,

Figura 57. Conexión entre el módulo 9263 con el variador de velocidad.



La señal de control para mantener el valor de la temperatura del agua por medio de la resistencia, así como la cantidad de aire en las UM por los tres ventiladores es generada por la tarjeta arduino por sus pines PWM a los relés de estado sólido que varían el voltaje entregado y así la potencia de trabajo de los elementos, la conexión de la tarjeta Arduino con los relés de estado sólido se muestra en la figura 58.

Figura 58. Conexión del control realizado por la tarjeta arduino en los relés de estado solido



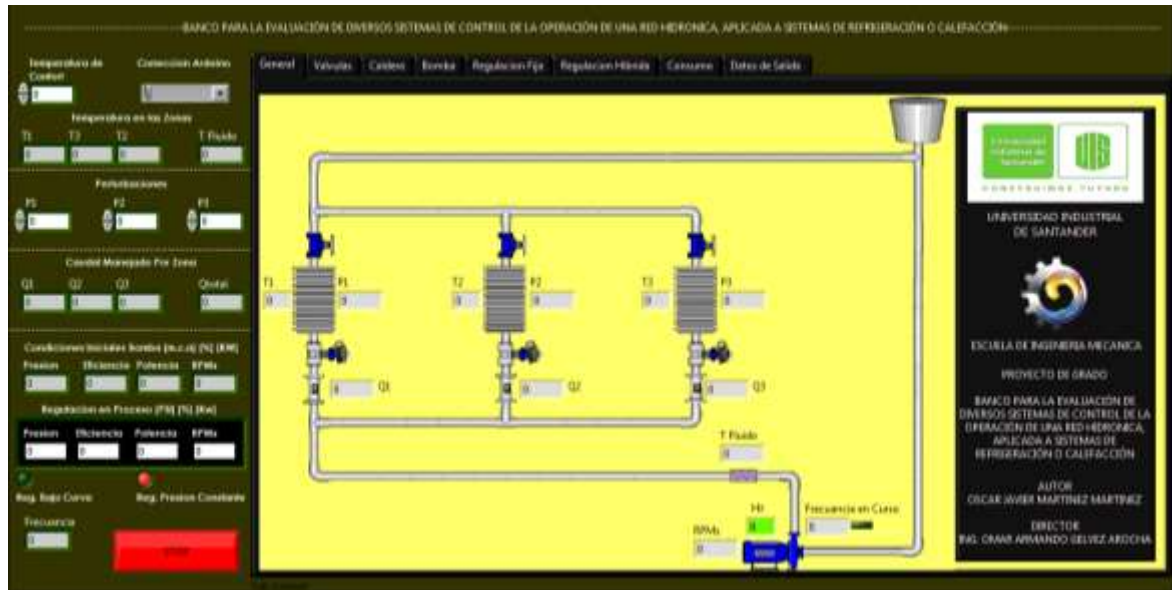
Teniendo claro los instrumentos seleccionados para la adquisición de datos y generación de señales para la aplicación del control realizado a la bomba y demás elementos que componen el banco, se explicara la interfaz creada para el proyecto.

➤ **EXPLICACIÓN DE LA INTERFAZ**

La interface es la parte del programa, que por medio de imágenes y objetos, presenta al usuario información y acciones que están disponibles por medio de un click del mouse. Esto permite una comunicación eficaz entre el usuario y los elementos del sistema.

La interface gráfica que se muestra en la figura 59, se diseño para un fácil control de los elementos y lectura de las variables de interés del proyecto.

Figura 59. Interfaz



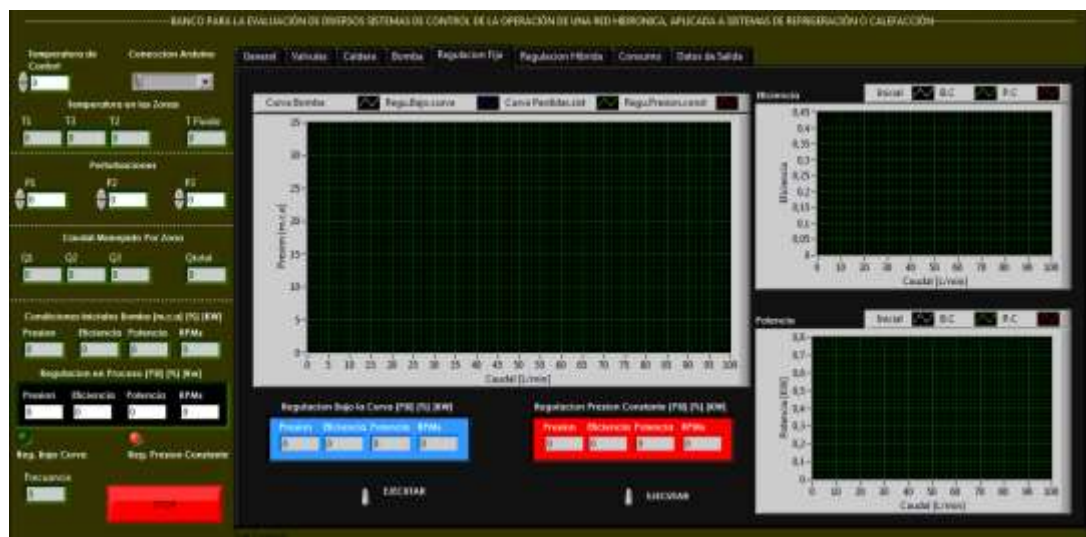
La función que cumple cada una de las partes más importantes del programa se describen a continuación:

RECUADRO VERDE: es donde se alojan las casillas donde se digitaran y visualizaran todos los datos del banco como: valor de las temperaturas en cada zona y del fluido, valor de las perturbaciones en el sistema, valor del caudal, requerido por cada zona, valor del caudal total, valor inicial de trabajo de la bomba, valores de trabajo durante su operación, indicador del modo de regulación que está en operación, valor de la frecuencia de trabajo de la bomba, conexión con la tarjeta Arduino.

RECUADRO NEGRO: Selección de los componentes más relevantes del banco junto con los tipos de regulación y registro de las variables de la bomba.

Elección del modo de operación del banco (Regulación Bajo la Curva o Regulación a Presión Constante), en la pestaña Regulación Fija o Regulación Híbrida, en este último se deberá especificar el caudal al cual se quiere cambiar el modo de regulación del sistema. Para Establecer los parámetros de control aplicados a la operación de la bomba

Figura 60. Selección del modo de operación.



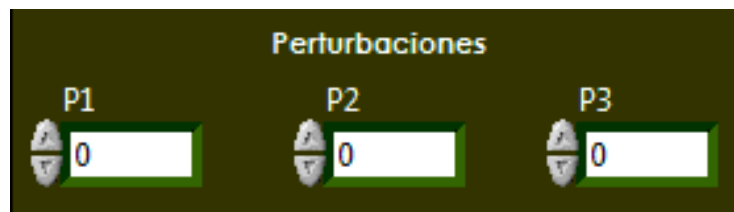
Ingresar el valor de temperatura del fluido: Iniciar el aporte de calor al agua por medio del calefactor eléctrico, bajo la acción de un control PID.

Figura 61. Ingreso de la temperatura de confort



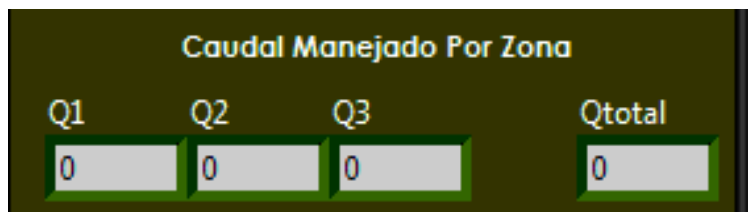
Ingresar valores de perturbación: El valor entre 0 – 100 regulara la operación de los ventiladores ubicados en cada una de las zonas, variado la cantidad de masa de aire entregada al radiador.

Figura 62. Perturbaciones



Al variar el flujo de aire en el intercambiador y cambiar la temperatura en la zona varia la masa de agua que pasa por la UM, manteniendo así el sistema en equilibrio, el valor de flujo se mostrara en los indicadores de caudal.

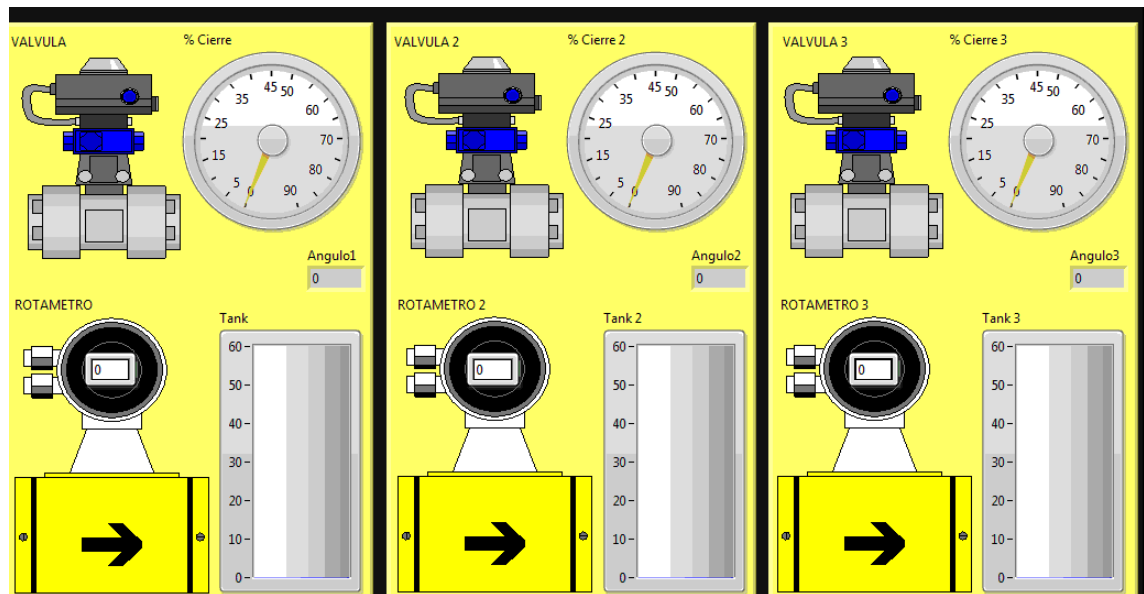
Figura 63. Caudales por zona



Este valor se toma como punto inicial en el control que rige la regulación del flujo por ramal por medio de un control proporcional ejecutado en los motores de las válvulas en un rango de 0 – 90 grados.

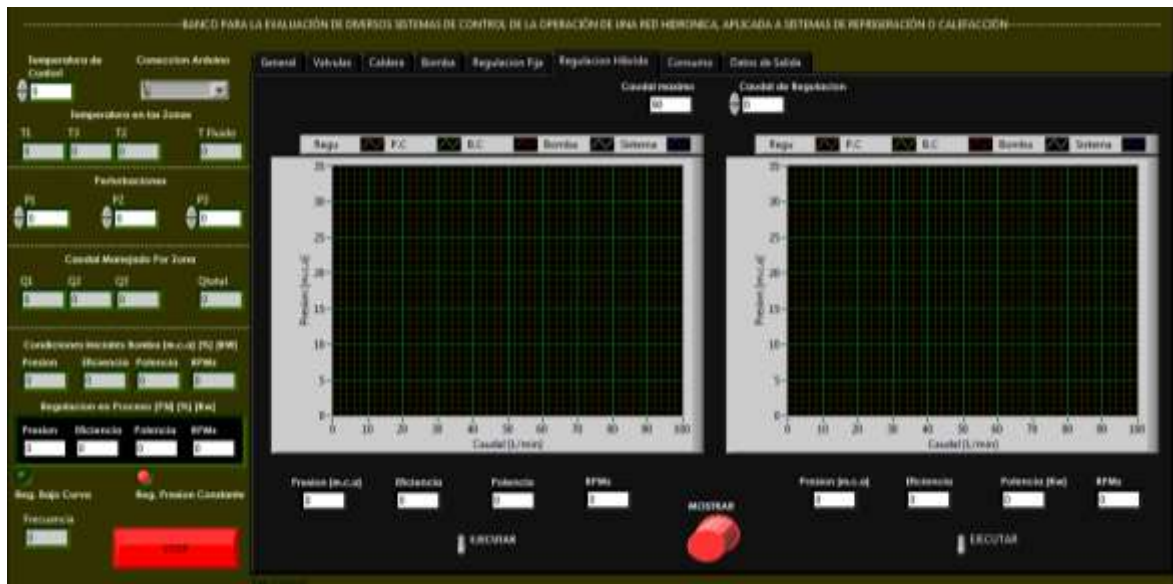
El cual se podrá observar en la pestaña Válvula, junto con la representación de los indicadores de caudal pasante que se podrán corroborar con los rotámetros instalados en cada una de las ramas del sistema

Figura 64. Apertura de válvulas e indicadores de caudal



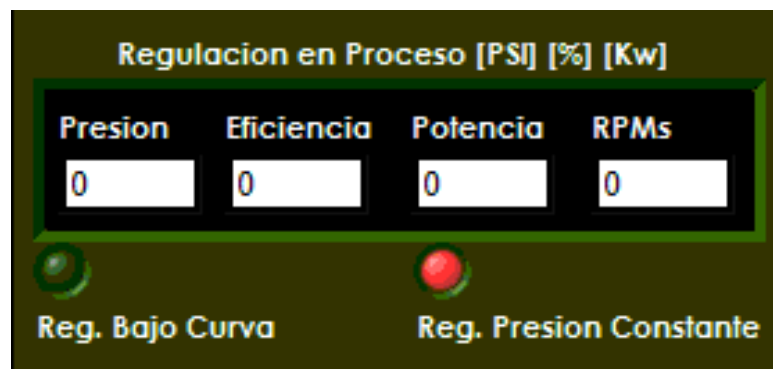
El valor de caudal total junto con la selección de un modo de operación del sistema son los indicadores necesarios para realizar el control del nuevo punto de operación de la bomba los cuales se podrán visualizar gráficamente en las pestaña de Regulación

Figura 65. Vista del punto de regulación



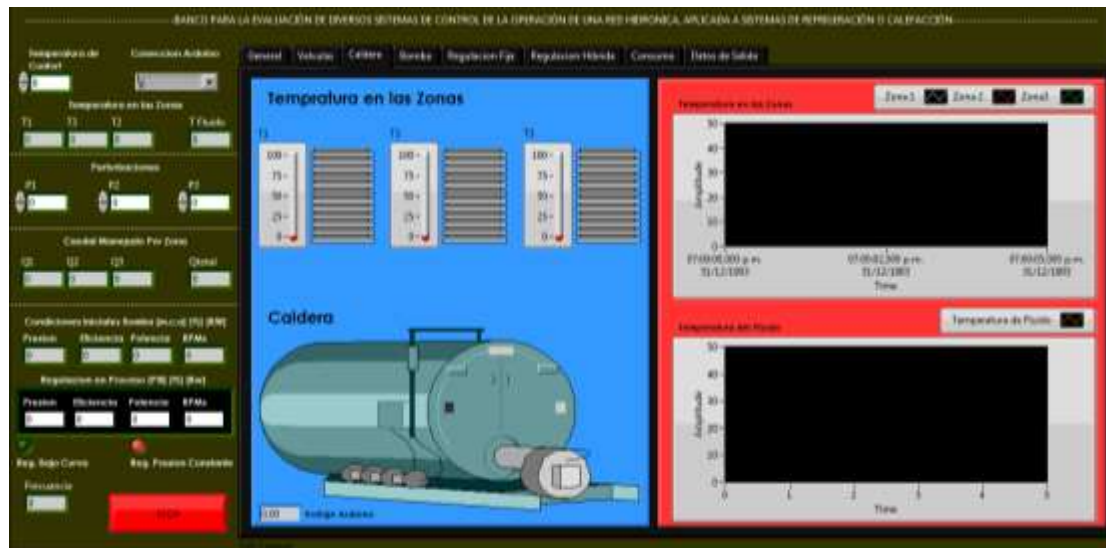
Así como numéricamente en el recuadro negro, junto con el led encendido indicando el tipo de regulación se está ejecutando.

Figura 66. Datos de la regulación



Los valores de temperatura en las zonas, se pueden ver en las pestaña CALDERA, como en la zona de datos generales de la interfaz

Figura 67. Visualización de las temperaturas del fluido y las zonas



La frecuencia de trabajo de la bomba junto con su consumo de potencia fluida y eléctrica se puede observar en la pestaña DATOS DE SALIDA.

Figura 68. Frecuencia y consumo de corriente



7. ANÁLISIS DEL VALOR DE CONSUMO DE POTENCIA ELÉCTRICA DE LA BOMBA BAJO LA OPERACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE CONTROL

Obtenidos los datos en la interfaz del proyecto se procede a realizar el análisis comparativo de la potencia medida durante la operación de la bomba del sistema bajo los escenarios de control descritos anteriormente. Este análisis se llevó a cabo respecto a una serie de pruebas realizadas en el banco, bajo los parámetros de cambio de carga térmica, iniciando el sistema con el caudal a carga máxima hasta el valor mínimo de caudal a carga parcial estipulado por las perturbaciones (disminución en la masa de aire ingresada a la UM), repitiendo las pruebas en cada uno de los escenarios de control.

➤ *Análisis del consumo de potencia de la bomba bajo el escenario de control RBC.*

Se comparan los valores de potencia eléctrica consumida por la bomba para los escenarios de control RBC y REFERENCIA.

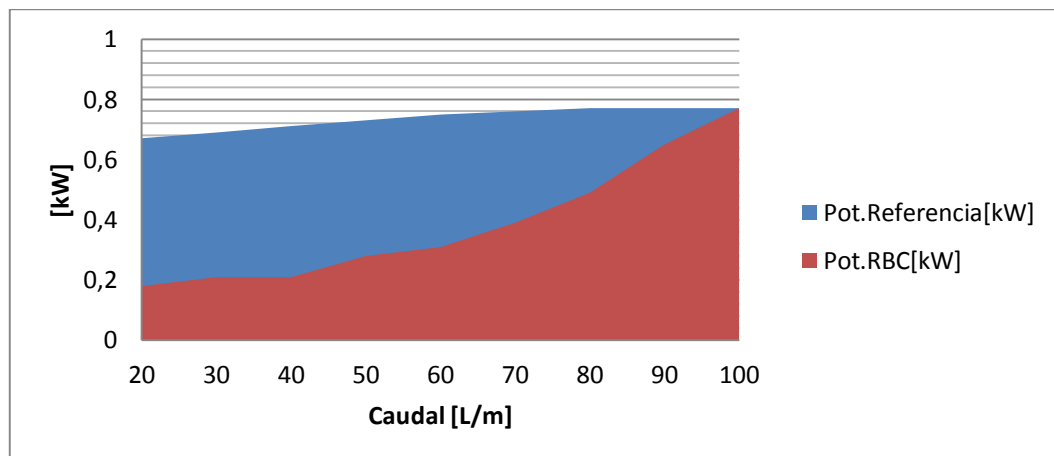
En la tabla 7 se muestran los resultados de las medidas de potencia obtenidas en la operación de la bomba y el porcentaje de ahorro al utilizar el escenario de control RBC, en intervalos de 10[L/min] entre carga máxima (100L/min) y carga parcial mínima (20[L/min]).

Tabla 7. Porcentaje de Ahorro de Potencia consumida bajo la operación de los escenarios de control REFERENCIA y RBC.

CAUDAL[L/min]	Pot.Referencia[kW]	Pot. RBC[kW]	Ahorro[%]
100	0,77	0,77	0
90	0,77	0,65	16,62
80	0,77	0,49	35,70
70	0,76	0,39	48,88
60	0,75	0,31	58,28
50	0,73	0,28	62,01
40	0,71	0,21	70,01
30	0,69	0,21	68,87
20	0,67	0,18	72,30

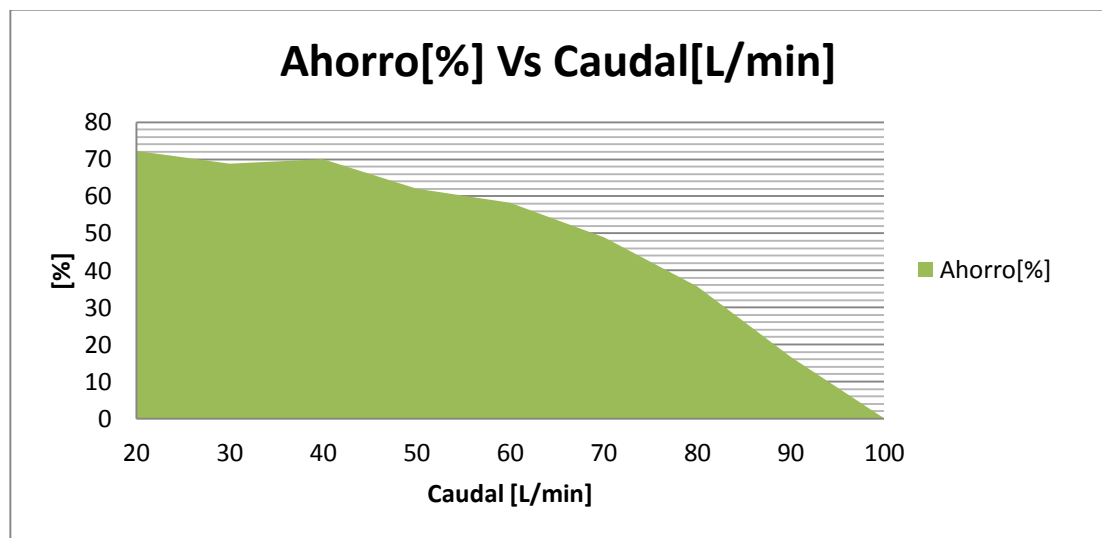
En la gráfica 70 se muestra la variación de la potencia medida bajo la operación de los escenarios de control REFERENCIA y RBC.

Figura 70. Datos obtenidos bajo el escenario de control RBC (regulación bajo la curva)



En la gráfica 71 se muestra porcentaje de potencia ahorrado en la operación de la bomba bajo el escenario de control RBC (bomba variable) en comparación con el escenario de control REFERENCIA (bomba fija).

Figura 71. Ahorro porcentual generado por la operación de la bomba bajo el escenario de control RBC



De la gráfica 70 y tabla 7 anterior se puede apreciar el aumento en el valor del porcentaje a medida que se necesita menos caudal lo que se traduce en un ahorro de energía a medida que el sistema no requiera operar bajo carga máxima.

➤ ***Análisis del consumo de potencia de la bomba controlado bajo el control RPC.***

Se analizarán los valores de potencia eléctrica consumida por la bomba para la regulación y se comparó con la potencia consumida con el escenario de referencia.

Este escenario tiene como limitante el valor de presión que se maneja ya que determina el valor de las rpm mínimas de trabajado de la bomba así un nivel de presión más alto tendrá un valor más alto de RPM de regulación, para las pruebas que se realizaron fueron bajo el valor de presión en el cruce de las curvas y manteniendo ese valor de presión se pudo trabajar hasta una frecuencia de 45 [Hz].

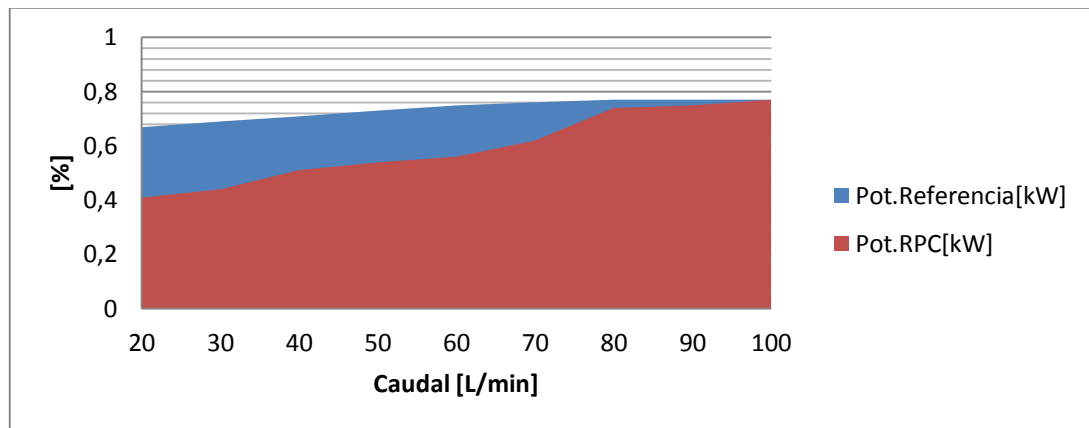
En la tabla 8 se muestran los resultados de las medidas de potencia obtenidas en la operación de la bomba y el porcentaje de ahorro al utilizar el escenario de control RPC, en intervalos de 10[L/min] entre carga máxima (100L/min) y carga parcial mínima (20[L/min]).

Tabla 8. Porcentaje de Ahorro de Potencia consumida bajo la operación de los escenarios de control REFERENCIA y RPC

CAUDAL[L/min]	Pot.Referencia[kW]	Pot. RPC[kW]	Ahorro[%]
100	0,77	0,77	0
90	0,77	0,75	3,41
80	0,77	0,74	4,18
70	0,76	0,62	18,92
60	0,75	0,56	24,94
50	0,73	0,54	26,23
40	0,71	0,51	28,23
30	0,69	0,44	36,69
20	0,67	0,41	38,10

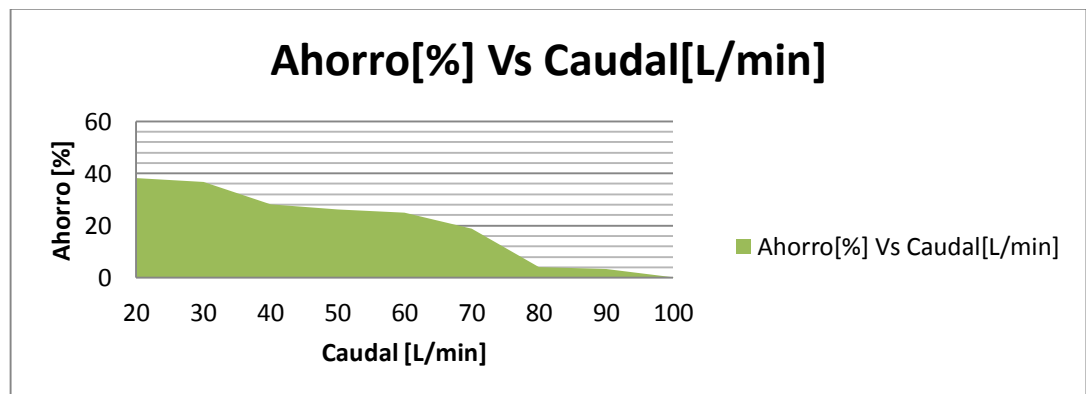
En la gráfica 72 se muestra la variación de la potencia medida bajo la operación de los escenarios de control REFERENCIA y RBC.

Figura 72. Datos obtenidos bajo el escenario de control RPC (regulación a presión constante)



El valor del ahorro en potencia obtenido en la operación de la bomba bajo el escenario de control RPC (bomba variable) contra el escenario de control REFERENCIA (bomba fija) se muestra en la figura.

Figura 73. Ahorro generado por la operación de la bomba bajo el escenario de control RPC



De la gráfica 72 y tabla 8 anterior se puede apreciar el aumento en el valor del porcentaje a medida que se necesita menos caudal lo que se traduce en un ahorro de energía a medida que el sistema no requiera operar bajo carga máxima.

➤ **Análisis del consumo de potencia entre los escenarios de control RBC y RPC**

En las tablas 7 y 8, se puede apreciar que en relación al escenario de control REFERENCIA, tanto el escenario de control RBC como el RPC presentan un porcentaje de ahorro. Este análisis se hace con el fin de conocer cuál de estos dos escenarios proporciona un mayor ahorro.

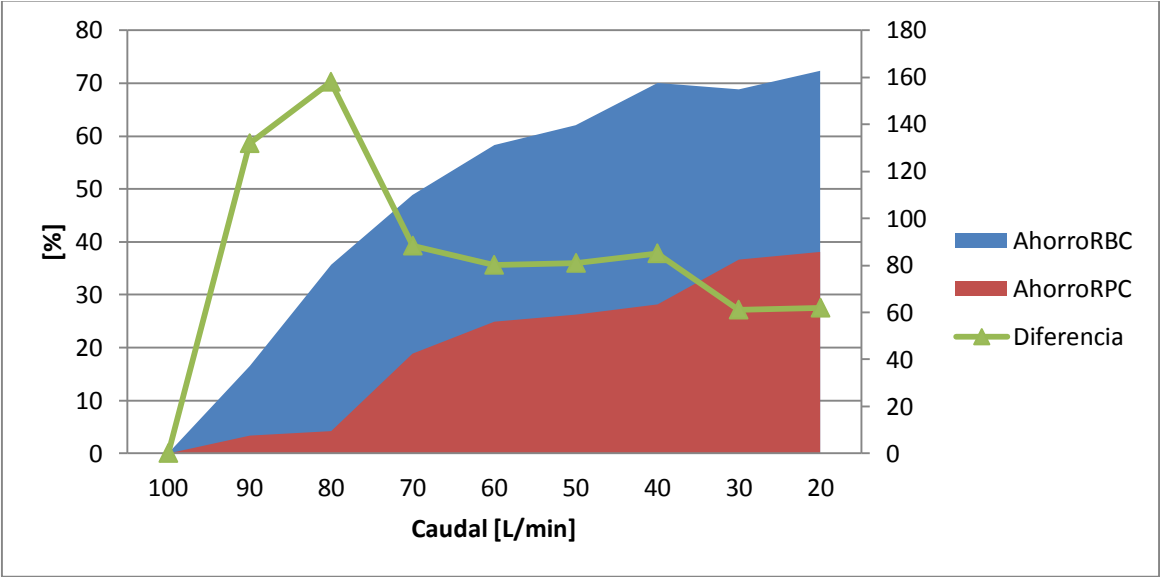
En la tabla 9 se presentan los ahorros obtenidos en la operación de la bomba bajos los escenarios RPC y RBC en comparación con el escenario de control REFERENCIA, y la diferencia porcentual de estos valores que indica el ahorro que tiene el escenario de control RBC en comparación al ahorro obtenido en el escenario RPC.

Tabla 9. Diferencia de la potencia consumida en un mismo rango de operación por los escenarios de control.

CAUDAL[L/min]	AhorroRBC[%]	AhorroRPC[%]	REFERENCIA[%]
100	0	0	0
90	16,62	3,41	131,90
80	35,7	4,18	158,074
70	48,88	18,92	88,378
60	58,28	24,94	80,12
50	62,01	26,23	81,10
40	70,01	28,23	85,06
30	68,87	36,69	60,97
20	72,3	38,1	61,97

Para una mejor visualización en la gráfica 74 se presentan visualmente los datos de la tabla 9.

Figura 74. Diferencia porcentual del ahorro entre los escenarios de control RPC y RBC.



8. CONCLUSIONES, OBSERVACIONES.

- ✓ La utilización de un variador de velocidad en la bomba mostro un ahorro en el consumo de potencia sustancial para la bomba de 1[HP] marca PEDROLLO, del 62[%] en el escenario de control RBC y 26[%] en el escenario de control RPC en comparación al valor de potencia consumida si se utilizara una bomba de velocidad fija (escenario REFERENCIA) a un caudal de 50[L/min], siendo mayor el porcentaje al disminuir el caudal.
- ✓ Un ahorro energético sustancial en los sistemas hidráulicos utilizados para calefacción utilizando variador de velocidad en la bomba ocurrirá en siempre que el sistema esté operando bajo condiciones menores a la de carga máxima, obteniendo el mayor ahorro cuando el sistema esté operando a cargas mínimas estándares que se realizaran en condiciones como:
 - Días con temperaturas agradables.
 - horas de no estancia de personal (desayuno, almuerzo y cena).
 - horas de no trabajo (horario nocturno, días festivos y fines de semana).
- ✓ Los valores de potencia medidos en la regulación del flujo por medio del escenario REFERENCIA utilizando la bomba en velocidad fija y regulando por acción de válvulas), tiene una variación mínima a medida que es regulado el caudal de trabajo, para una bomba de baja potencia.
- ✓ Realizar un balance de acuerdo a los requerimientos de flujo impuesto por una UM, desbalancea la operación de las demás UM ya que su regulación repercute en el flujo que pasa por estas, provocando que las válvulas que regulan su flujo se cierren o abran constantemente buscando un equilibrio.

- ✓ El escenario de control RBC tiene utiliza el rango total de frecuencia de trabajo del elemento (15 a 60[Hz]), mientras que el escenario de control RPC está limitado por el valor de la presión que se quiere mantener
- ✓ El escenario de control RBC muestra el aumento más significativo en la operación de una bomba respecto a la condición de bomba de velocidad fija (escenario REFERENCIA) así como de bomba de velocidad variable (escenario RPC).
- ✓ Las gráficas de potencia consumida Vs Rpm muestran un comportamiento similar al patrón del modo de regulación.

BIBLIOGRAFÍA

AMTRONG LIMITED. Bombas de velocidad variable inteligentes: Serie IVS y series IVS sin sensores. [en línea] [Toronto, Ontario] Amstrong Limited, 2011 [citado 18 agosto 2015] Disponible en Internet: http://www.fmcm.com.mx/manuales/armstrong/IVS_Sensorless_brochure.ES.pdf

CARRIER AIR CONDITIONING COMPANY. Proyecto de la tubería. En: Manual de aire acondicionado. 6 ed. New York: McGraw-hill. 1980. p. 3-1 – 3-89.

CREUS SOLE, Antonio. Elementos finales de control. En: Instrumentación Industrial. 6ed. Madrid: Alfaomega/ Marcombo, 1997. p. 365 - 480.

KAKAC, sadik. LIU, Hongtan. Basic design methods of heat exchanger. En: Heat exchangers selection, rating and thermal design. 2000. 2 ed. New York: CRC PRESS LLC. P. 33-76.

KELLER, Christian. Equilibrado hidráulico y bombas electrónicas. [en línea] Wilo. 2015. [Alcalá de Henares: España] [citado 3 junio 2015] Disponible en Internet: http://www.fenercom.com/pages/pdf/formacion/14-06-12_Jornada%20sobre%20Reparto%20de%20Costes%20de%20Calefacci%C3%B3n%20en%20edificios%20existentes/04-BOMBAS-CON-VARIADOR-DE-VELOCIDAD-Y-SISTEMAS-DE-EQUILIBRADO-WILO-fenercom-2014

OLSSON, Martin. Design principles for hydronic heating systems constant and variable flow control system. En: Chalmers. 2010. 1 ed. Sweden: Department of energy and environment

McQUISTON, Faye, PARKER, Jerald. SPITLER, Jeffrey. Flujo, bombas y diseño de la tubería. En: Calefacción, ventilación y aire acondicionado. 1 ed. México: limusa, S.A. 2003. p. 297 – 361.

ROBERT, Petijean. Equilibrado hidráulico con controladores de presión diferencial. 3 ed. 2003. Suecia: Tour & Andersson AB.

WILO. Principios fundamentales de la tecnología de las bombas centrifugas. 4 ed.[en línea] Wilo, 2005. [Dormunt: Alemania] [citado 2 noviembre 2014]. Disponible en internet: http://www.wilo.es/fileadmin/es/Downloads/pdf_entero.pdf

YORKLAND CONTROLS Ltd. Application guide. Variable frequency driver in retrofit or new applications. [en línea] [Toronto, Mississauga] Yorkland controls ltd. Enviromental solution 2011 [citado el 2 enero 2015]. Disponible en internet: https://www.yorkland.net/downloads/vfd_apguide.pdf,