



UNIVERSIDAD DE CARABOBO.
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA MEDICIÓN Y CONTROL REMOTO DE
VARIABLES UTILIZADAS EN PROCESOS INDUSTRIALES.**

TUTOR ACADÉMICO

Ing. Luis W. Escalona.

AUTOR

Br. RAUL A. TREJO MOLINA

Bárbula, Junio de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO.
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA MEDICIÓN Y CONTROL REMOTO DE
VARIABLES UTILIZADAS EN PROCESOS INDUSTRIALES.**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

TUTOR ACADÉMICO

Ing. Luis W. Escalona.

AUTOR

Br. RAUL A. TREJO MOLINA

Bárbula, Junio de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO.
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes miembros del Jurado designado para evaluar el Trabajo Especial de Grado titulado *“Diseño de un sistema para la medición y control remoto de variables utilizadas en procesos industriales.”*, realizado por el bachiller: Raúl Arturo Trejo Molina, C.I.: 15.881.111, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Prof. Luis W. Escalona
Tutor

Prof. Thalia San Antonio
Jurado

Prof. Napoleón González.
Jurado

Bárbula, Junio de 2009

DEDICATORIA

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado en primer lugar a Dios que me ha dado la oportunidad de vivir éste momento. A mis padres a quienes amo y admiro, y siempre me han brindado su apoyo y amor incondicional, me han motivado constantemente para que luche por mis sueños, y me han iluminado con sus consejos en los buenos y malos momentos para lograr el éxito. A mi hermano que siempre ha sido mi compañía, a quien amo y admiro. A mi abuelo Chucho y mi abuela María que siempre recuerdo y llevo en el corazón, y desde el cielo han intercedido y velado por mí en todo momento. A Felipe Echeverría, Carlos Rincones, Jazmín Ramírez, Inés Barrios, María Hoyle, quienes me han brindado su amistad y apoyo por largo tiempo, y han sido participes de la historia de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad de Carabobo por haberme dado la oportunidad de superarme y formar parte de la nueva generación de profesionales de la Republica, y muy especialmente a la Facultad de Ingeniería y a todo su personal docente por haber servido de guía, inspiración y modelo a seguir, también agradezco a todo el personal administrativo y obrero, ya que sin su intervención nada de esto sería posible.

Agradezco muy especialmente al Profesor Luís W. Escalona, por servir de guía y brindarme su conocimiento y apoyo constante y desinteresadamente durante la realización de este trabajo de grado.

Al Ing. Carlos Álvarez, por brindarme su ayuda y conocimientos técnicos que fueron de gran ayuda para el desarrollo de este trabajo.

A todos mis familiares, amigos, y conocidos que estuvieron presentes, pendientes y de alguna forma me brindaron su apoyo durante la carrera.

RESUMEN

RESUMEN

Este Trabajo Especial de Grado perteneciente a la línea de investigación de Automatización y Control titulado “Diseño de un sistema para la medición y control remoto de variables utilizadas en procesos industriales” Trata la necesidad existente de mejorar y actualizar la infraestructura del Laboratorio de Automatización y Control (LCAU), perteneciente a la Escuela de Ingeniería Mecánica, que cuenta con una serie de equipos e instrumentos para el desarrollo de las prácticas de laboratorio de la asignatura Instrumentación Industrial. Se plantea entonces como objetivo general Diseñar un sistema para la medición y control remoto de variables utilizadas en procesos industriales, y como objetivos específicos la identificación de las necesidades existentes en el LCAU; diseñar una planta piloto para la medición de variables asociadas a un fluido en fase líquida; diseñar el sistema de medición y control remoto de las variables, desarrollar la ingeniería de detalles necesaria para la construcción e implementación, y realizar el análisis de costos del diseño planteado.

Este proyecto sigue una línea metodológica de tipo aplicada, descriptiva, correlacional y cualitativa, que busca la aplicación de conocimientos adquiridos, se evalúan los atributos de cada solución planteada y se hace comparaciones para determinar la más adecuada, y describe la situación actual. Basado en la investigación, se determinaron las características que debía tener la planta piloto y las necesidades del LCAU, haciendo una comparación entre el programa sinóptico de la asignatura Instrumentación Industrial y los equipos presentes en el laboratorio. Se realizó el diseño de los tanques basado en las normas ASME sección VIII “Reglas para la construcción de recipientes sujetos a presión”. Se realizó el diseño de la red de flujo utilizando el Manual del Instituto de Hidráulica. Se realizó el diseño de la estructura de soporte para todos los equipos haciendo el análisis de esfuerzos utilizando el método de los elementos finitos. Se realizó el diseño del sistema de medición y control remoto de variables, basado en un sistema de adquisición de datos que permite entradas y salidas de señales analógicas y digitales y se presentan diagramas basados en las normas ISA-20-1981. Se hizo el análisis de costos, recolectando información acerca de precios de los equipos y materiales, mediante cotizaciones.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTOS	VII
RESUMEN	VIII
INTRODUCCIÓN	1
1. CAPÍTULO I	3
1.1. TÍTULO.....	3
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.3. OJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS.....	4
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.4. JUSTIFICACIÓN	5
1.5. LIMITACIONES	5
1.6. DELIMITACIONES	5
2. CAPÍTULO II.....	7
2.1. ANTECEDENTES.....	7
2.1.1. GHINI, GABRIELE (JUNIO DE 1999) [5].....	7
2.1.2. ALJIBES, PASCUAL-PAREDES, ARNALDO (NOVIEMBRE DE 1993) [1].....	7
2.1.3. GUNT HAMBURG (2004).....	8
2.1.4. FESTO ESTACIÓN PCS COMPACT.....	8
2.2. ASPECTOS TEÓRICOS REFERENTES A LA INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL Y EL CONTROL AUTOMÁTICO.....	9
2.2.1. LAZO DE CONTROL.....	9
2.2.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y CONTROL.....	11
2.2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y CONTROL.....	13
2.2.4. SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	16
2.3. ASPECTOS TEÓRICOS BÁSICOS DE REDES DE FLUJO.....	19
2.3.1. ECUACIÓN DE EQUILIBRIO PARA FLUJO INCOMPRESIBLE DE UN SISTEMA FLUIDO.....	19
2.3.2. PÉRDIDAS POR FRICCIÓN Y POR FORMA EN SISTEMAS DE TRANSPORTE DE FLUIDO.....	21
2.3.3. REDES DE FLUJO.....	24
2.3.4. BOMBAS CENTRÍFUGAS.....	25
2.3.5. FUENTES Y SUMIDEROS (TANQUES).....	30
2.4. ASPECTOS BÁSICOS DE DISEÑO Y CÁLCULO DE RECIPIENTES SOMETIDOS A PRESIÓN INTERNA.....	30
2.4.1. FORMAS Y TIPOS DE CABEZALES DE RECIPIENTES SOMETIDOS A PRESIÓN INTERNA.....	31
2.4.2. CÁLCULO DE PARED DE CASCO CILÍNDRICO DE RECIPIENTES SOMETIDOS A PRESIÓN INTERNA.....	33
2.4.3. ACCESORIOS DE RECIPIENTES Y OTROS ELEMENTOS.....	35
2.5. ASPECTOS BÁSICOS DE DISEÑO Y CÁLCULO DE RECIPIENTES DE SECCIÓN RECTANGULAR.....	36
3. CAPÍTULO III	39
3.1. NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN.....	39
3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	39
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	42
3.4. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	42

ÍNDICE GENERAL

4. CAPÍTULO IV	43
4.1. NECESIDADES DEL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL DE ACUERDO A LOS OBJETIVOS DE LA ASIGNATURA.....	43
4.1.1. OBJETIVO GENERAL.....	43
4.1.2. CONTENIDO.....	44
4.1.3. ANÁLISIS DE LOS OBJETIVOS Y TEMAS PROPUESTOS PARA LA ASIGNATURA Y LAS NECESIDADES DEL LABORATORIO.....	47
4.2. CRITERIOS Y RESTRICCIONES PARA EL DISEÑO.....	50
4.2.1. CRITERIOS.....	50
4.2.2. RESTRICCIONES.....	50
4.3. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN.....	51
4.3.1. MÓDULOS DE CONTROL DE VARIABLES.....	51
4.3.2. ARREGLO DE 2 TANQUES Y UN INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	53
4.3.3. ARREGLO DE DOS TANQUES CILÍNDRICOS Y UN TANQUE DE SECCIÓN TRANSVERSAL RECTANGULAR.....	55
4.3.4. ARREGLO DE TRES TANQUES CILÍNDRICOS.....	57
4.4. DISCUSIÓN Y SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA.....	59
4.5. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN SELECCIONADA.....	64
4.6. DISEÑO DEL SISTEMA HIDRÁULICO.....	66
4.6.1. DISEÑO DEL TANQUE 1.....	66
4.6.2. DISEÑO DEL TANQUE 2.....	75
4.6.3. DISEÑO DEL TANQUE 3.....	79
4.6.4. DISEÑO DE LA RED DE FLUJO Y SELECCIÓN DE LA BOMBA.....	82
4.7. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA USANDO EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	101
4.7.1. SELECCIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO PARA EL DISEÑO.....	102
4.7.2. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO.....	104
4.7.3. ANÁLISIS DE CONVERGENCIA.....	104
4.7.4. DISEÑO DEL SOPORTE DEL TANQUE 1.....	105
4.7.5. DISEÑO DEL SOPORTE DEL TANQUE 2.....	108
4.7.6. DISEÑO DE LAS COLUMNAS DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE DE LOS TANQUES 1 Y 2.....	112
4.7.7. DISEÑO DE LAS VIGAS PRINCIPALES.....	116
4.7.8. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA SOPORTE DE LOS TANQUES 1 Y 2.....	120
4.8. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	125
4.8.1. MEMORIA DESCRIPTIVA.....	125
4.8.2. FILOSOFÍA DE CONTROL.....	126
4.8.3. INGENIERÍA CONCEPTUAL.....	127
4.8.4. INGENIERÍA BÁSICA.....	128
4.8.5. SELECCIÓN DE ELEMENTOS PRIMARIOS, TRANSMISORES Y ELEMENTOS FINALES PARA LAZOS DE CONTROL DE TEMPERATURA.....	129
4.8.6. SELECCIÓN DE ELEMENTOS PRIMARIOS, Y TRANSMISORES PARA LAZOS DE CONTROL DE NIVEL.....	130
4.8.7. SELECCIÓN DE ELEMENTOS PRIMARIOS, Y TRANSMISORES PARA LAZOS DE CONTROL DE PRESIÓN.....	132
4.8.8. SELECCIÓN DE ELEMENTOS PRIMARIOS, Y TRANSMISORES PARA LAZOS DE CONTROL DE CAUDAL.....	133
4.8.9. SELECCIÓN DE VÁLVULAS DE CONTROL.....	134
4.8.10. SELECCIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.....	134
4.8.11. SELECCIÓN DEL CONTROLADOR.....	135
4.8.12. INGENIERÍA DE DETALLES.....	137

ÍNDICE GENERAL

4.9. ANÁLISIS DE COSTOS.....	138
4.9.1. ALTERNATIVA DE INVERSIÓN A, (SISTEMA DISEÑADO).....	138
4.9.2. ALTERNATIVA DE INVERSIÓN B (EQUIPO GUNT HAMBURG).....	142
4.9.3. ALTERNATIVA DE INVERSIÓN C.....	144
4.9.4. DECISIÓN DE INVERSIÓN.....	144
5. CAPÍTULO V	147
5.1. CONCLUSIONES.....	147
5.2. RECOMENDACIONES	148
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149
7. APÉNDICE 1: DIMENSIONAMIENTO DE LA VÁLVULA DE CONTROL.	151
8. ANEXOS	154
ANEXO 1.....	154
ANEXO 2.....	156
ANEXO 3.....	159
ANEXO 4.....	161
ANEXO 5.....	164
ANEXO 6.....	173
ANEXO 7.....	183
ANEXO 8.....	197
ANEXO 9.....	200
ANEXO 10.....	204
ANEXO 11.....	204
ANEXO 12.....	204

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Lazo abierto de control. [3]	11
Figura 2.2 Lazo de control cerrado. [3]	11
Figura 2.3 Esquema general de un sistema de adquisición de datos. [11].....	17
Figura 2.4 Intercambios posibles de energía en un volumen de control generalizado.	19
Figura 2.5 Traspaso de la energía desde la máquina al fluido. [11]	26
Figura 2.6 Principales partes de una bomba centrífuga. [11].....	26
Figura 2.7 Representación física de una bomba y sus curvas de comportamiento.	28
Figura 2.8 Posibles arreglos de sistemas de bombeo para estudio de cavitación. [7]	29
Figura 2.9 Tipos de cabezales en recipientes sometidos a presión interna.	32
Figura 2.10 Cordón de soldadura longitudinal y circunferencial.....	34
Figura 2.11 Valores de α en función de la relación H/L del tanque [9].....	37
Figura 2.12 Dimensiones a utilizar para el diseño de tanques de sección rectangular.	38
Figura 3.1 Diagrama de flujo del diseño de la investigación.	41
Figura 4.1 Módulos de control de variables.	52
Figura 4.2 Diagrama P&I de los módulos de control de variables	53
Figura 4.3 Arreglo de dos tanques y un intercambiador de calor.....	54
Figura 4.4 Diagrama P&I del arreglo de dos tanques y un intercambiador.....	55
Figura 4.5 Arreglo de dos tanques cilíndricos y un tanque de sección transversal rectangular.....	56
Figura 4.6 Diagrama P&I del arreglo de dos tanques cilíndricos y un tanque de sección transversal rectangular.	57
Figura 4.7 Arreglo de tres tanques cilíndricos.	58
Figura 4.8 Diagrama P&I del arreglo de tres tanques cilíndricos	59
Figura 4.9 Esquema preliminar de la alternativa de solución seleccionada.	65
Figura 4.10 Boquillas y conexiones necesarias en el tanque.	69
Figura 4.11 Dimensiones del anillo de la base. [9].....	72
Figura 4.12 Estructura de la base del tanque 2 (dimensiones en mm).	76
Figura 4.13 Detalle de la entrada de fluido al tanque, placa acondicionadora (dimensiones en mm).....	77
Figura 4.14 Corte de las láminas de acrílico para fabricar el tanque 1(dimensiones en mm).....	78
Figura 4.15 Estructura de la base del tanque 3 (dimensiones en mm).	80
Figura 4.16 Detalle de la entrada del tanque, placas acondicionadoras de flujo (dimensiones en mm).	80
Figura 4.17 Detalle de los rompedores de vórtice (dimensiones en mm).	81
Figura 4.18 Corte de las láminas de acrílico para fabricar el tanque 3 (dimensiones en mm).	82
Figura 4.19 Configuración de la red de flujo.	83
Figura 4.20 Esquema de la red de flujo.	84
Figura 4.21 Tramos y dimensiones de la red de tuberías (mm), vista frontal.....	85
Figura 4.22 Dimensiones de la red de tuberías (mm), vista lateral.	87
Figura 4.23 Distancias L_1 y L_2 mínimas para la colocación de la placa orificio.	91
Figura 4.24 Curva del comportamiento de la bomba Disponibilidad vs. Caudal.....	95
Figura 4.25 Comportamiento del sistema cuando sólo trabajan los tanques 1 y 3.....	97
Figura 4.26 Comportamiento de la bomba a una velocidad de giro de 1750rpm.....	99
Figura 4.27 Comportamiento del sistema cuando sólo trabajan los tanques 2 y 3.....	100
Figura 4.28 Partes críticas de la estructura sometidas al método de elementos finitos.....	101
Figura 4.29 Soporte del tanque 1.....	105
Figura 4.30 Fuerzas y restricciones aplicadas al soporte del tanque 1.	106
Figura 4.31 Curva de convergencia del esfuerzo máximo de von Mises con el numero de nodos de la malla aplicada.	106
Figura 4.32 Distribución de las tensiones máximas de von Mises en la pieza.	107
Figura 4.33 Distribución del factor de seguridad en la pieza.....	108
Figura 4.34 Soporte del tanque 2.....	109
Figura 4.35 Fuerzas y restricciones aplicadas al soporte del tanque 2.	109

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 4.36 Curva de convergencia del esfuerzo máximo de von Mises con el numero de nodos de la malla aplicada.</i>	110
<i>Figura 4.37 Distribución de las tensiones máximas de von Mises en la pieza.</i>	111
<i>Figura 4.38 Distribución del factor de seguridad en la pieza.....</i>	112
<i>Figura 4.39 Fuerza aplicada sobre el soporte del tanque 1.....</i>	121
<i>Figura 4.40 Fuerza aplicada sobre el soporte del tanque 2</i>	121
<i>Figura 4.41 Restricciones aplicadas a la estructura.</i>	122
<i>Figura 4.42 Gráfico Esfuerzo máximo de von Mises relacionado con el número de nodos.....</i>	122
<i>Figura 4.43 Distribución de las tensiones máximas de von Mises en la estructura.</i>	124
<i>Figura 4.44 Distribución del factor de seguridad en la estructura.</i>	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Actividades del laboratorio de Instrumentación Industrial	45
Tabla 4.2 Tabla comparativa del contenido de la asignatura con los equipos de laboratorio.....	48
Tabla 4.3 Comparación de las ventajas de cada alternativa.	62
Tabla 4.4 Comparación de las desventajas de cada alternativa.	63
Tabla 4.5 Algunas propiedades del agua a diferentes temperaturas. [6].....	66
Tabla 4.6 Especificaciones de diseño para el tanque 1.	66
Tabla 4.7 Peso de cascos y cabezas (lbf). [10].....	70
Tabla 4.8 Dimensiones del anillo de la base. [10]	72
Tabla 4.9 Número de pernos de anclaje. [10].....	73
Tabla 4.10 Esfuerzo máximo permitido en pernos usados como anclas. [10].....	73
Tabla 4.11 Especificaciones de diseño del tanque 2.	75
Tabla 4.12 Especificaciones de diseño del tanque 3.	79
Tabla 4.13 Velocidad de flujo en una tubería de 1/2 pulgada.....	86
Tabla 4.14 Características de los tramos de tubería.	87
Tabla 4.15 Cantidad de válvulas y accesorios necesarios en la red de flujo, por tramo.	88
Tabla 4.16 Pérdidas por cada 100m de tubería de PVC (mca).	89
Tabla 4.17 Pérdidas por cada 100m de tubería de acero.[6]	89
Tabla 4.18 Pérdidas por fricción en accesorios de PVC (mca).	89
Tabla 4.19 Pérdidas por fricción ocasionadas por las válvulas (mca).	90
Tabla 4.20 Número de Reynolds para el tramo 3	92
Tabla 4.21 Coeficientes de descarga de la placa orificio.	92
Tabla 4.22 Coeficiente de flujo C de la placa orificio.	93
Tabla 4.23 Coeficiente de resistencia del orificio k_{orif}	93
Tabla 4.24 Velocidad luego del orificio y pérdidas por fricción causadas por la placa orificio.....	94
Tabla 4.25 Comportamiento de la bomba Disponibilidad vs. Caudal.....	94
Tabla 4.26 Puntos para la curva de comportamiento del sistema cuando sólo trabajan los tanques 1 y 3.	96
Tabla 4.27 Punto de trabajo del sistema cuando sólo trabajan los tramos 3-4 y 4-1.	96
Tabla 4.28 Comportamiento de la bomba con una velocidad de giro de 1750rpm.....	98
Tabla 4.29 Comportamiento del sistema cuando sólo trabajan los tanques 2 y 3.	99
Tabla 4.30 Punto de trabajo del sistema cuando sólo trabajan los tramos 3-4-1.....	100
Tabla 4.31 Factores utilizados para determinar un factor de seguridad para materiales dúctiles[12].	102
Tabla 4.32 Cantidad y tipos de señales a manejar por el sistema de adquisición de datos.	136
Tabla 4.33 Precio de equipos y materiales.....	139
Tabla 4.34 Monto de la opción de inversión B para el año 2007.....	142
Tabla 4.35 Índices de precios al consumidor año 2007, 2008 y 2009[2].	143
Tabla 4.36 Costos totales de la opción C.....	144
Tabla 4.37 Comparación económica entre las dos alternativas.....	144

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo recopila una investigación estructurada por capítulos, que aborda los tópicos de mayor importancia para el diseño de un sistema para la medición y control remoto de variables utilizadas en procesos industriales. Se estima que el trabajo genere un aporte relevante en el desarrollo de actividades de laboratorio de la cátedra instrumentación industrial por su carácter didáctico, a la vez que coadyuve al enriquecimiento intelectual de la comunidad estudiantil de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

La situación problemática plantea las necesidades y carencias encontradas en el Laboratorio de Automatización y Control (LCAU), respecto a antigüedad de equipos o su carencia, lo que lleva a la necesidad de diseñar un sistema capaz de actualizar La infraestructura del laboratorio, que incluya la posibilidad de desarrollar nuevas actividades, y que permita al estudiantado acercarse físicamente a lo que en muchos casos sólo es accesible a través de la lectura, explicaciones, e investigaciones. Por lo tanto el diseño incluye el máximo nivel de detalles que permitirá una posterior construcción y puesta en marcha de este proyecto.

En el Capítulo I se presenta el estudio de la situación problemática, a partir el cual se planteó el objetivo general, los objetivos específicos, limitaciones y delimitaciones del proyecto.

En el Capítulo II se hace referencia a los antecedentes de este proyecto y se desarrollan las bases teóricas, en donde se abarcan tópicos relacionados con la instrumentación industrial y el control automático, redes de flujo, diseño de tanques sometidos a presión interna, y diseño de tanques de sección rectangular sometidos a la presión estática del fluido que contienen.

INTRODUCCIÓN

En el Capítulo III se define el nivel de la investigación, y se hace el diseño de la misma. Se definió el tipo de investigación es de tipo aplicada, descriptiva y por último es correlacional y cualitativa.

En el Capítulo IV se describe el sistema diseñado mediante la clara y justificada exposición de criterios técnicos, los métodos de cálculo, y resultados obtenidos a partir de programas de computador para asistir al diseño mecánico, como los son Microsoft Visio, AutoCad, y Solid Works, que permitieron el diseño y la selección de los elementos que conforman el sistema diseñado.

En el Capítulo V se presentan las conclusiones a las que se llegaron con la culminación de éste trabajo, y se plantean recomendaciones para futuros trabajos relacionados, y modificaciones.

CAPÍTULO I

1.1. TÍTULO

“Diseño de un sistema para la medición y control remoto de variables utilizadas en procesos industriales”.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo cuenta con una serie de laboratorios orientados hacia la demostración experimental de los tópicos teóricos presentados en las diferentes asignaturas, entre estos laboratorios se encuentra el LCAU (Laboratorio de Automatización y Control), cuyo principal objetivo es afianzar los contenidos asociados con el área de instrumentación, automatización y control industrial desde la perspectiva y perfil del ingeniero mecánico y de este modo contribuir a que el egresado afronte con éxito los retos y cambios que día a día se presentan en la industria.

El Laboratorio de Automatización y Control, perteneciente a la Escuela de Ingeniería Mecánica, cuenta con una serie de equipos e instrumentos para el desarrollo de las prácticas de laboratorio de la asignatura Instrumentación Industrial desactualizados y deteriorados, esto afecta el desarrollo de experiencias basadas en el estudio del comportamiento estático de los instrumentos. Adicionalmente, no se cuenta con la infraestructura y recursos para realizar experiencias donde se evidencie el comportamiento dinámico de los instrumentos de medición, se desarrollen lazos de control automático o se implementen aplicaciones basadas en adquisición de datos, esto representa una limitación importante en el desarrollo de las actividades que se deben llevar a cabo en el LCAU en lo que respecta al logro de objetivos de la asignatura Instrumentación Industrial y en el afianzamiento de los contenidos tratados en la asignatura Principios de Control Automático de cara a los nuevos tiempos.

CAPÍTULO I – DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Es por ello necesario desarrollar un proyecto que permita la actualización de la infraestructura y tecnología utilizada en el laboratorio de Instrumentación Industrial, el desarrollo de prácticas de regulación automática y el desarrollo de aplicaciones de adquisición de datos.

1.2.1. Formulación del problema.

Diseñar un sistema para la medición y control remoto de variables de procesos industriales en el Laboratorio de Automatización y Control de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

1.3. OJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

Para lograr el desarrollo del proyecto es necesario plantear los objetivos generales y específicos, estos se detallan a continuación:

1.3.1. Objetivo general.

Diseñar un sistema para la medición y control remoto de variables utilizadas en procesos industriales.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Determinar las características del laboratorio de Instrumentación en función a los objetivos contemplados en la asignatura para así identificar las necesidades existentes.
- Realizar el diseño de una planta piloto para la medición de variables asociadas a un fluido en fase líquida.

CAPÍTULO I – DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

- Realizar el diseño del sistema para la medición y control de las variables de la planta piloto de acuerdo con las necesidades identificadas.
- Desarrollar la ingeniería de detalles necesaria para la construcción de la planta piloto y la implementación del sistema de medición y control diseñado.
- Realizar un estudio de análisis de costos del diseño planteado.

1.4. JUSTIFICACIÓN

El mejoramiento y actualización de la infraestructura del Laboratorio de Automatización y Control permitirá que los futuros egresados de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo tengan la posibilidad de afianzar de manera precisa los conocimientos teóricos de la asignatura instrumentación industrial con la parte práctica, desde el punto de vista académico y profesional.

Asimismo, contar con tecnología actualizada permitirá la diversificación de las actividades desarrolladas en el Laboratorio de Automatización y Control, tanto en las cátedras de Principios de Control Automático e Instrumentación Industrial, como en el área de investigación y extensión.

1.5. LIMITACIONES

- El tiempo de diseño no debe exceder dos periodos lectivos.
- El tamaño o dimensión del sistema diseñado estará limitado al espacio físico disponible en el LCAU.

1.6. DELIMITACIONES

- Para el diseño de la planta piloto se considerará un máximo de cuatro variables, las cuales son: presión, temperatura, nivel y caudal.

CAPÍTULO I – DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

- Los equipos y materiales seleccionados para el diseño de la planta piloto deben encontrarse en el mercado nacional.
- La tecnología a utilizar permitirá manipular solo una variable a la vez.
- El diseño de la planta piloto debe permitir la implementación de sistemas de adquisición de datos que permitan la medición y control por computadora.

CAPÍTULO II

En este capítulo se presentan los antecedentes que se relacionan con este proyecto; también se describen tópicos básicos que permiten la comprensión de los distintos temas que deberán abordarse en la realización de este trabajo.

2.1. ANTECEDENTES.

Actualmente existen en la Escuela de Ingeniería Mecánica una serie de Trabajos Especiales de Grado

2.1.1. Ghini, Gabriele (junio de 1999) [5].

Desarrolló el trabajo de grado titulado “Diseño de una unidad para el estudio de cuatro variables principales de medición y control a lazo abierto y cerrado”, el cual tuvo como fin realizar el diseño para dotar de una unidad experimental (planta piloto) al Laboratorio de Instrumentación y Control de la escuela de Ingeniería Mecánica de la UC mediante el manejo de cuatro variables de control, como lo son: flujo, nivel, temperatura, y presión. Este diseño contempla la dotación de un gran número de equipos para el control y medición de las variables de forma no remota (sin sistema de adquisición de datos) en un sistema de recirculación de agua dispuesto a través de una amplia red de tuberías. Este trabajo de grado es de gran importancia y constituye una referencia de importancia considerable porque se desarrolló para el mismo laboratorio.

2.1.2. Aljibes, Pascual-Paredes, Arnaldo (noviembre de 1993) [1].

Desarrollaron el trabajo de grado titulado “Rediseño e ingeniería de detalles de los simuladores de procesos para el laboratorio de Control”. Este trabajo de grado consistió en el diseño, construcción y puesta a punto de (3) plantas pilotos en el

laboratorio de control de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UC, para el estudio de las variables nivel, flujo y presión mediante la implementación de lazos de control.

Las plantas construidas fueron dotadas con la instrumentación necesaria para implementar diversos lazos de control, con una consola central provista de diferentes tipos de controladores electrónicos para que el operario evalúe diferentes tecnologías e implemente diversos esquemas de control.

2.1.3. Gunt Hamburg (2004).

Al revisar fuentes electrónicas tales como Internet, es posible conseguir en el mercado empresas como GUNT HAMBURG (2004), que ha desarrollado plantas piloto y bancos de ensayo para simular el control de procesos industriales. Vale la pena citar el banco modelo RT 582 que es un completo y ampliamente equipado banco experimental de laboratorio que ofrece diversos ensayos referidos al control de procesos, como lo son: ensayos de regulación de presión, nivel, caudal y temperatura. Hay que resaltar el hecho que en este modelo se integra la tecnología de los sistemas de adquisición de datos y control por computadora para los ensayos de regulación.

2.1.4. Festo estación PCS Compact.

Éste equipo desarrollado por la compañía Festo es una estación de carácter didáctico, que permite a los usuarios trabajar con 4 tipos de regulación, (nivel, presión, caudal y temperatura) que pueden activarse individualmente o en combinación unos con otros permitiendo una formación en las diversas facetas del control PID. El control puede ser realizado por PLC, consolas de simulación, reguladores industriales, y a través de la integración de una PC y un programa de control computarizado.

2.2. ASPECTOS TEÓRICOS REFERENTES A LA INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL Y EL CONTROL AUTOMÁTICO.

Los procesos industriales actuales deben obedecer a los criterios de calidad y normativas existentes, algunos de estos criterios o normas impuestos por entes gubernamentales, por políticas internas, o por los consumidores del servicio o bien que se produce; esto puede influir directamente en el proceso productivo, haciendo necesario un control de las variables que intervienen.

En el principio de la era industrial, el control de los procesos se hacía de manera manual, pero con el desarrollo tecnológico y el aumento de complejidad de los procesos de producción el control manual se hizo insuficiente y nació el control automático. El control automático permite mantener ciertas características que satisfacen las necesidades de calidad y operación segura de los equipos; además aísla a los operarios de las situaciones riesgosas presentes en el proceso, y convierte su labor en supervisión al disminuir su intervención sobre los equipos, en consecuencia la necesidad de mano de obra pasiva, y el error humano se reducen. Todo esto permite una disminución de los costos de operación que compensa con creces la inversión que requiere la automatización de un proceso. Sin embargo, para gozar de las ventajas del control automático, es necesario comprender y conocer ciertos conceptos básicos, y otros conceptos de mayor profundidad que se exponen a continuación.

2.2.1. Lazo de control

Un lazo de control es el conjunto de elementos que permiten el mantenimiento de las variables como la temperatura, nivel, flujo, y presión en valores constantes, o hace

CAPÍTULO II – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

posible su relación respecto a otra variable. Estos elementos son la unidad de medida, una unidad de control, un elemento final de control y el propio proceso.

El control automático se basa en tomar la medida de la variable en su estado actual, comparar con un valor deseado (o punto consigna), y tomar una decisión respecto a la acción correctiva a aplicar, por último, esta decisión es aplicada a través del elemento final de control directamente sobre el proceso, o manipulando otra variable. Los lazos de control pueden ser abiertos o cerrados, la diferencia está en la existencia o ausencia del elemento final de control.

El lazo de control abierto (figura 2.1) es aquel en que la acción de control no depende de la salida, y se caracteriza por que la habilidad que estos tienen para ejecutar una acción con exactitud depende de la calibración, o el reestablecimiento de la relación entre la entrada y la salida; y por otra parte, no presentan el problema de inestabilidad que se tiene en los lazos de control cerrados.

El lazo de control cerrado (figura 2.2) es aquel en el que en cierto modo la acción de control depende de la salida, por lo general se les denominan de retroalimentación ya que permiten que la salida sea comparada con la entrada del sistema manera que se establezca una acción de control apropiada como función de la diferencia entre la entrada y la salida. Estos lazos se caracterizan por ser más exactos, tienen menos sensibilidad en la salida, y tienden a la oscilación o la inestabilidad si no son apropiadamente ajustados.

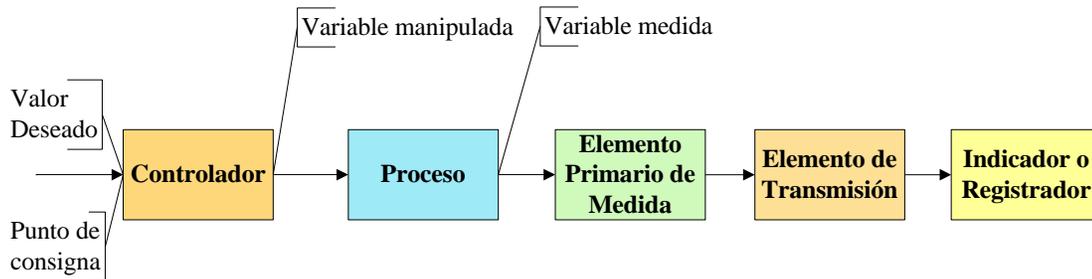


Figura 2.1 Lazo abierto de control. [4]

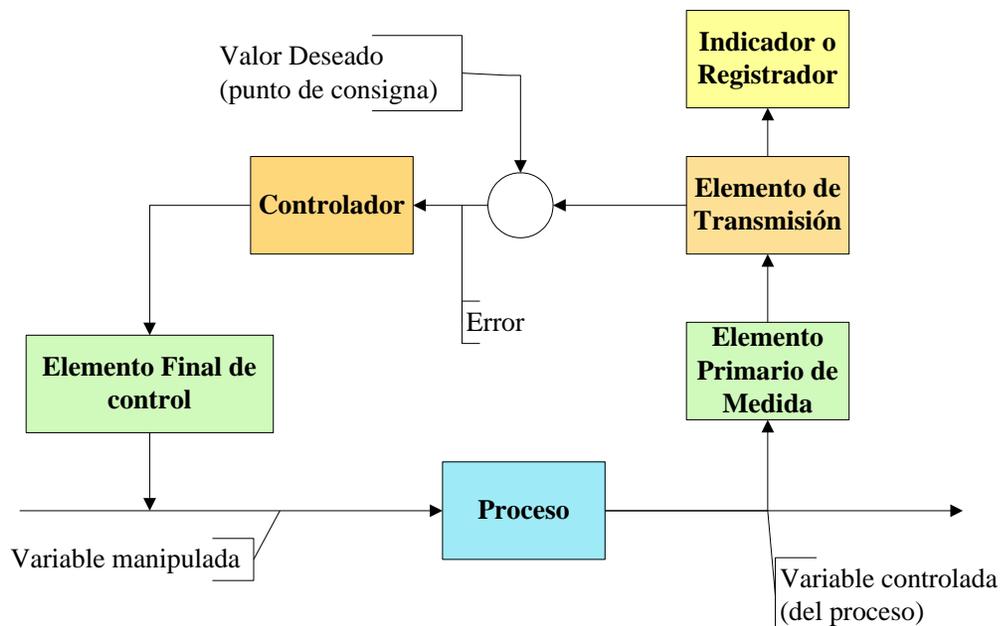


Figura 2.2 Lazo de control cerrado. [4]

2.2.2. Características de los instrumentos de medición y control.

Los instrumentos de medición y control poseen características estáticas y dinámicas, que permiten su selección, determinar sus limitaciones y que definen su comportamiento; a continuación se explicarán brevemente algunas de estas características de acuerdo a las sugerencias hechas por SAMA (Scientific Apparatus Makers Association) en su norma PMC 20-2-1970 para la unificación de los términos.

- a) **Campo de Medida o Rango**, se refiere al espectro de valores de la variable medida que se encuentran comprendidos entre el límite superior y el inferior de la capacidad de medida o transmisión del instrumento y se expresa estableciendo los dos valores extremos.
- b) **Alcance o Span**, es la diferencia algebraica entre el límite superior y el inferior del campo de medida del instrumento.
- c) **Error**, es la diferencia algebraica entre el valor leído y el valor real de la variable, cuando el sistema se encuentra en condiciones de régimen permanente el error se conoce como error estático, y cuando se encuentra en condiciones dinámicas, el error se conoce como error dinámico, y varía debido a los retardos que existen en la transmisión desde la toma de la medida, hasta la indicación; este retardo dependerá del fluido que se mide, de la velocidad, y de la protección o tipo de elemento primario utilizado.
- d) **Incertidumbre de medida**, es la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos al verdadero valor de magnitud medida. Para su cálculo interviene la distribución estadística de los resultados de series de mediciones y las características de los equipos.
- e) **Exactitud**, es la cualidad de un instrumento por la que tiende a dar lecturas próximas al valor real de la magnitud medida.
- f) **Precisión**, es la tolerancia de medida o de transmisión de del instrumento y define los límites del error cometido cuando el instrumento es utilizado en condiciones normales y durante un período determinado. La precisión se puede expresar como un tanto por ciento del alcance, de la lectura

efectuada, del valor máximo del campo de medida, o de longitud de la escala, y también directamente en las unidades de medida.

- g) **Zona muerta**, es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida.
- h) **Sensibilidad**, es la razón entre el incremento de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona después de haberse alcanzado el estado de reposo. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida.
- i) **Repetibilidad**, es la capacidad de reproducir las posiciones de la pluma, el índice o señal de salida del instrumento al medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación, recorriendo todo el campo. Por lo general se considera en su valor máximo y se expresa en tanto por ciento del alcance.
- j) **Histéresis**, es la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por el índice o la pluma del instrumento para el mismo valor cualquiera del campo de medida, cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos ascendente y descendente. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida.

2.2.3. Clasificación de los instrumentos de medición y control.

Existe una amplia gama de equipos que conforman los elementos del lazo de control; estos se clasifican de acuerdo a su función dentro del lazo, o de acuerdo a la variable del proceso a medir y controlar. Esta clasificación no es la única que existe, pero se considera la más completa.

De acuerdo a la función en el lazo de control se clasifican en:

- a) **Instrumentos indicadores**, como bien lo dice su nombre son los que indican la magnitud de la variable del proceso al momento de realizar la medición, y esta indicación se hace mediante escalas graduadas e índices, y en la actualidad también existen indicaciones digitales que se hacen con el valor numérico de la magnitud medida.
- b) **Instrumentos ciegos**, son aquellos instrumentos que no poseen una indicación de la magnitud de la variable medida o regulada.
- c) **Instrumentos registradores**, estos instrumentos permiten llevar un registro histórico del comportamiento de la variable que se estudia en el proceso, mediante el trazo continuo o de puntos, en papel graduado o con escalas que permiten determinar el valor de la variable en función del tiempo, de ciclos de trabajo, etc.
- d) **Elementos primarios**, son los que se encuentran en contacto con el fluido o con la variable del procesos que se desea medir; tomando energía del proceso y la transforman mediante distintos principios físicos en señales que pueden ser utilizadas por el lazo de control para tomar decisiones, y sobre la variable controlada aplicar las acciones correctivas.
- e) **Transmisores**, estos instrumentos reciben las señales enviadas por los elementos primarios, y las transmiten a algún lugar remoto en forma de señales neumáticas (3-15) psi, eléctricas (4-20) mA, ambos tipos de señal proporcionales a la variable de proceso, además pueden transmitir señales

digitales (0,1), hidráulicas, y telemétricas, entre otras. En algunos casos el transmisor puede estar integrado con el elemento primario.

- f) **Transductores**, son instrumentos que reciben una señal de entrada función de una o más cantidades físicas y son capaces de realizar operaciones lógicas o matemáticas con las señales recibidas, y producir una señal de salida. Dependiendo de la aplicación puede ser un elemento primario, un transmisor, un relay o un convertidor.
- g) **Convertidores**, son instrumentos que reciben un tipo de señal y la modifican en una señal de salida estándar de diferente tipo, para lograr la compatibilidad de las señales entre el elemento que transmite y el que recibe.
- h) **Receptores**, como su nombre lo indica, estos instrumentos reciben señales de otros elementos como los transmisores o los convertidores, y los registran o indican. Los receptores controladores envían una señal de salida normalizada al elemento final de control, en respuesta a la señal recibida.
- i) **Controladores**, son unos de los elementos más importantes, pues son los encargados de comparar el estado actual del proceso con el deseado, y posteriormente, en base a la diferencia, enviar una señal al elemento final de control que tienda a corregir la desviación.
- j) **Elemento final de control**, es el elemento receptor de la señal enviada por el controlador, que al estar en contacto directo con el proceso ejerce un cambio en este, de tal manera que se manipula una variable para hacer tender al proceso al estado deseado.

De acuerdo a la variable del proceso que miden o controlan se clasifican en instrumentos de nivel, temperatura, presión, caudal, ph, peso, conductividad, etc. Esta clasificación corresponde a la variable medida y no al tipo de señal utilizada para transmitir o controlar el proceso; además se incluye en esta clasificación definiciones de la clasificación anterior, teniéndose por ejemplo transmisores de nivel, controladores de temperatura, etc.

Por otra parte también se clasifican en instrumentos de campo, o de panel, refiriéndose esto, a su posición respecto al proceso, es decir, los instrumentos de campo son aquellos que se mantienen en contacto directo con el proceso, y los instrumentos de panel, son aquellos que se encuentran en salas aisladas del proceso.

2.2.4. Sistemas de adquisición de datos.

Entre los más grandes avances tecnológicos en el área de la medición y control de variables, se encuentra la inclusión de la electrónica y la microelectrónica mediante los sistemas de adquisición de datos, cuyo objetivo fundamental es la integración de los diferentes recursos que lo componen, y la utilización de sus características específicas, para aumentar el nivel de automatización y control de una o mas variables en los procesos industriales.

Un sistema de adquisición de datos es un equipo electrónico cuya función es el control o registro de una o más variables involucradas en un proceso cualquiera; de manera general puede estar compuesto por los siguientes elementos: Sensores, acondicionadores de señal, aisladores, multiplexores analógicos, multiplexores digitales, circuitos “Sample and Hold”, conversores de señal Analógico/Digital (A/D) y viceversa (D/A), Microprocesadores, contadores, filtros, comparadores, y fuentes de energía.

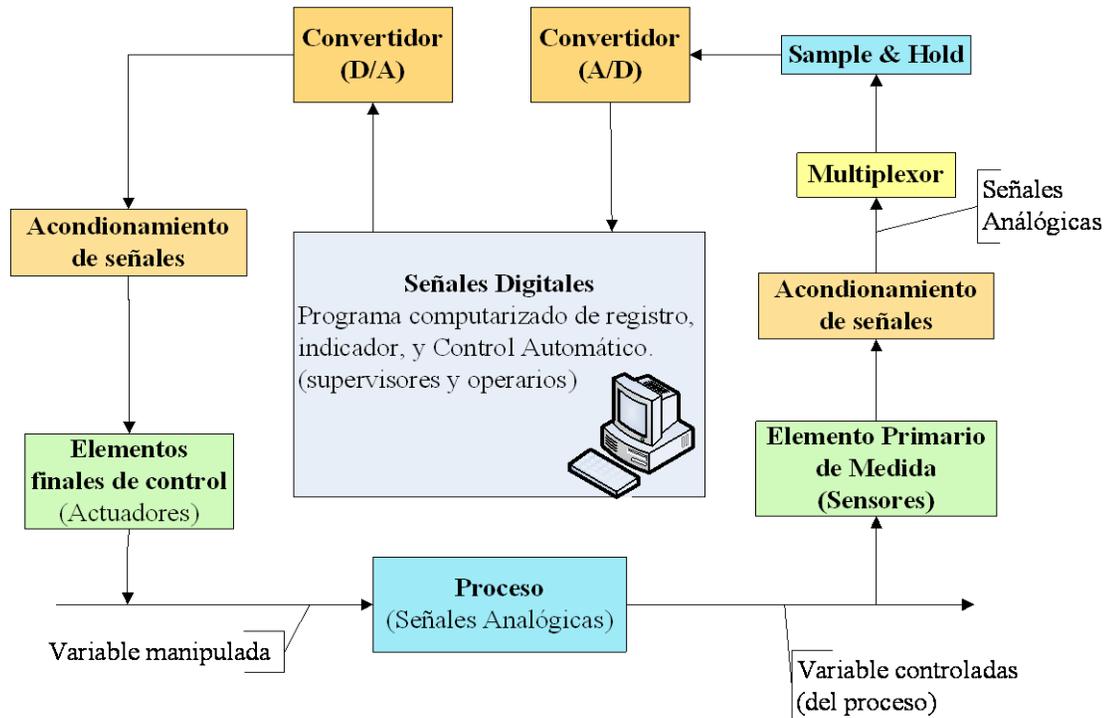


Figura 2.3 Esquema general de un sistema de adquisición de datos. [12]

En la figura 2.3 se observa el arreglo general de un sistema de adquisición de datos o SAD, y a continuación se explicarán brevemente los elementos que lo componen.

- a) **Sensores:** en los sistemas de adquisición de datos son los que convierten el fenómeno físico, o variable controlada en una variable eléctrica, que tiende por naturaleza a variar levemente desde un estado a otro, o analógicamente; Esta variable o señal puede ser tensión, corriente, resistencia eléctrica, inductancia, capacitancia, etc.
- b) **Acondionadores de señal:** su función es la de hacer que la señal eléctrica enviada por el sensor sea transformada en únicamente voltaje, y que el rango de variación de la variable a medir, es decir que el mínimo y el máximo valor del sensor corresponda con el máximo y el mínimo que

admite el conversor de señales analógicas. Adicionalmente el acondicionador de señales puede realizar el filtrado de valores de ruido no deseados en la variable medida.

- c) **Multiplexores:** cuando se desea utilizar y convertir múltiples señales analógicas, y cuando la necesidad de velocidad no es un impedimento, se puede utilizar el multiplexor que es un mecanismo de interruptores que permiten múltiples entradas y una única salida, hacia el convertidor de señales analógico/digital, los cambios de interruptor, o canal de transmisión son controlados por programas de computadora o algún otro aditamento.

- d) **Sample and hold:** estos circuitos se utilizan para mantener estable el valor de la señal analógica, mientras el convertidor hace las operaciones necesarias; la mayoría de las veces esto se logra con capacitadores para almacenar el voltaje de la señal analógica, y un interruptor electrónico conecta y desconecta el capacitador de la entrada analógica. La velocidad a la cual esto sucede se llama rata de muestra o sampling rate.

- e) **Convertidores de señales analógico/digital (A/D), y digital/ analógico (D/A):** los convertidores A/D son dispositivos electrónicos que convierten una señal eléctrica continua en un código digital equivalente para ser utilizado o registrado en una computadora o en un microprocesador; los convertidores D/A convierten una señal digital en una señal analógica de corriente, o voltaje, para ser utilizada por actuadores, tales como bobinas de accionamientos de válvulas, interruptores de motores, entre otros.

2.3. ASPECTOS TEÓRICOS BÁSICOS DE REDES DE FLUJO.

En los distintos procesos industriales se utilizan las redes de flujo como método de transporte de fluidos, bien sea en el proceso principal de producción, o en un proceso secundario; cualquiera sea la importancia de la red, estará integrada por bombas centrífugas, tanques, tuberías y accesorios. Es necesario el estudio de los fundamentos teóricos y principios de funcionamiento, de los elementos que componen las redes de flujo para lograr un diseño adaptado a las leyes termodinámicas, y de flujo de fluidos, y así poder predecir su comportamiento real de manera más precisa y exacta. A continuación se presentan los fundamentos relacionados a las redes de flujo.

2.3.1. Ecuación de equilibrio para flujo incompresible de un sistema fluido.

Tomando como referencia un volumen de control generalizado es posible establecer un sistema en donde se presentan las condiciones necesarias para el estudio de una red de flujo. La figura 2.4 presenta un volumen de control con sus posibles interacciones de energía.

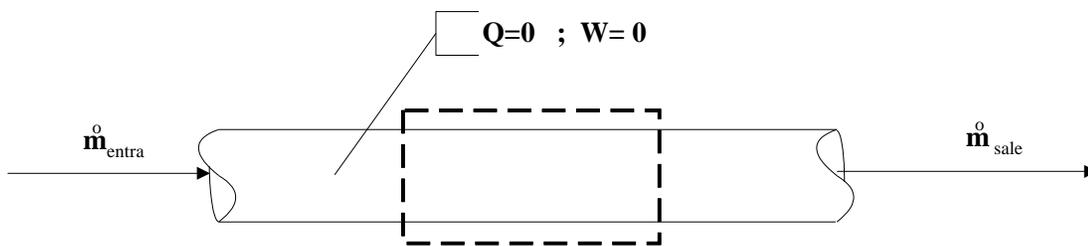


Figura 2.4 Intercambios posibles de energía en un volumen de control generalizado.

Para determinar la ecuación de equilibrio se deben realizar los balances de masa (ecuación 2.1) y de energía (ecuación 2.2), de manera que se puedan establecer relaciones entre las propiedades y los cambios que se producen durante las interacciones en el volumen de control.

CAPÍTULO II – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para el balance de masa se tiene que el flujo másico que sale debe ser igual a el flujo másico que entra más la tasa de caudal másico.

$$\dot{m}_{sale} = \dot{m}_{entra} \pm \frac{d\dot{m}}{dt}_{v.c.} \quad (2.1)$$

En el caso de procesos de flujo permanente la tasa de caudal másico es igual a cero.

En el caso de el balance de energía en la ecuación 2.2, las interacciones de energía que entran denotadas con el subíndice “e”, deben ser iguales a las que salen denotadas con el subíndice “s”, resultando cero como resultado de la diferencia entre ambas

$$\frac{d\dot{m}_{v.c.}}{dt} = \sum \dot{m}_e * h_e - \sum \dot{m}_s * h_s + \dot{W} - \dot{Q} = 0 \quad (2.2)$$

La energía específica (e) asociada al caudal másico está representado por h_o en la ecuación 2.3.

$$h_o = \frac{U + P * V + m * \frac{V^2}{2} + m * g * Z}{m} = u + P * v + \frac{V^2}{2} + g * Z \quad (2.3)$$

Luego sustituyendo la ecuación 2.3 en el balance de energía se obtiene la ecuación 2.4.

$$\sum \dot{m}_e * \left(u + P * v + \frac{V^2}{2} + g * Z \right)_e - \sum \dot{m}_s * \left(u + P * v + \frac{V^2}{2} + g * Z \right)_s + \dot{W} - \dot{Q} = 0 \quad (2.4)$$

Considerando un tubo de corriente y dividiendo por la aceleración de gravedad, se obtiene la ecuación 2.5.

$$\left(\frac{P_e}{\gamma_e} + \frac{V_e^2}{2 * g} + Z_e \right) - \left(\frac{P_s}{\gamma_s} + \frac{V_s^2}{2 * g} + Z_s \right) = \frac{\dot{Q} - \dot{W}}{m * g} + \frac{u_s - u_e}{g} \quad (2.5)$$

Se define como disponibilidad (H), o también conocido como la ecuación de Bernoulli a la ecuación 2.6 (Ecuación de equilibrio para flujo incompresible de un sistema fluido):

$$H = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2 * g} + Z \quad (2.6)$$

Para un tramo de tubería, donde solo existe transporte de caudal másico sin interacciones de calor ni trabajo se define la diferencia de disponibilidad entre la entrada y la salida con la ecuación 2.7.

$$H_e - H_s = \frac{u_s - u_e}{g} \quad (2.7)$$

En ésta expresión la pérdida de disponibilidad (h_{es}) en un tramo de tubería comprendido entre los puntos e y s, esta representada por el lado izquierdo de la ecuación 2.7.

2.3.2. Pérdidas por fricción y por forma en sistemas de transporte de fluido.

Existen dos clases de pérdidas de disponibilidad en un arreglo de tuberías y accesorios cuyo significado no es más que la resistencia al paso del fluido por la red incrementando el nivel de exigencia, de las turbomáquinas.

Una de ellas son las pérdidas de superficie o por fricción (h_f) que son producidas por el contacto del fluido con la tubería, rozamiento de unas capas de fluido con otras (régimen laminar) o de las partículas entre sí (régimen turbulento). Las otras existentes son las pérdidas de forma que son producto de la transición (estrechamientos o expansiones) entre las tuberías y codos, válvulas, y toda clase de accesorios que conforman la red.

Las pérdidas por fricción pueden ser determinadas mediante diversas ecuaciones, siendo la ecuación de Darcy-Weisbach (ecuación 2.8) la más utilizada.

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} = f * \frac{L}{D} * \frac{Q^2}{2 * g * A^2} \quad (2.8)$$

Donde L es la longitud del tramo de tubería, D es el diámetro de la tubería, Q es el caudal, A es el área transversal de la tubería, g la aceleración de la gravedad y el término f es el factor de fricción, que es una función del número de Reynolds (Re), de la rugosidad absoluta de la tubería y del diámetro de la tubería. Este factor se evalúa por el diagrama de Moody o mediante la ecuación de Colebrook- White (ecuación 2.10.) para números de Reynolds mayores a 2000.

Se define el número de Reynolds, como una relación adimensional parámetro de la resistencia producto del cociente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas en el movimiento de un fluido mediante la ecuación 2.9.

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad (2.9)$$

CAPÍTULO II – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Cuando el número de Reynolds es menor a 2000 se dice que es un régimen de flujo laminar, si es mayor a 4000 se dice que es régimen de flujo turbulento, y la zona existente entre 2000 y 4000 se llama de transición y el flujo es inestable.

$$f = \left(A - \frac{B - A}{C - 2 * B + A} \right)^2 \quad (2.10)$$

Los valores de los términos A, B y C, se obtienen mediante las ecuaciones 2.11, 2.12 y 2.13, donde ε/D es la rugosidad relativa de la tubería, y Re es el número de Reynolds correspondiente a al flujo que se tiene.

$$A = - * \log \left(\frac{\varepsilon}{D} + \frac{12}{\text{Re}} \right) \quad (2.11)$$

$$B = -2 * \log \left(\frac{\varepsilon}{D} + \frac{2.51 * A}{\text{Re}} \right) \quad (2.12)$$

$$C = -2 * \log \left(\frac{\varepsilon}{D} + \frac{2.51 * B}{\text{Re}} \right) \quad (2.13)$$

Para régimen laminar o números de Reynolds menores a 2000, para calcular el factor de fricción se utiliza la ecuación 2.14

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (2.14)$$

Las pérdidas por la forma vienen dadas a través de la ecuación 2.15.

$$h_s = k * \frac{V^2}{2 * g} \quad (2.15)$$

En donde κ representa al coeficiente de pérdida de cada accesorio asociado a la red de flujo. Este valor se determina mediante las ecuaciones presentadas por las Cartas Crane para el cálculo del factor de resistencia para válvulas y accesorios con sección de paso reducido.

Todos estos cálculos de pérdidas por fricción y por la forma, pueden realizarse de igual manera y más fácilmente a través del uso del Manual del Instituto de hidráulica.

2.3.3. Redes de flujo.

Una red de flujo consta de tuberías y accesorios, de sumideros y fuentes (tanques), de bombas hidráulicas. Las tuberías y los accesorios son los que añaden la mayor resistencia al paso del flujo. Adicionalmente se sabe que a la red de flujo se añadirán equipos de filtración, y equipos de proceso que trabajan con el fluido, entre otros, que añaden resistencia adicional al movimiento del fluido, y que deben ser considerados al momento del cálculo para así escoger el sistema de bombeo adecuado.

Las pérdidas de disponibilidad que experimenta el flujo cuando circula por los elementos que integran el sistema se determinan mediante la ecuación 2.16:

$$h_{total} = \sum h_{f_{tramos\ rectos}} + \sum h_{s_{accesorios}} + \sum h_{equipos} \quad (2.16)$$

En el término $\sum h_{equipos}$ de la ecuación 2.17 se toman en cuenta los valores de diferencia de presión (ΔP) existente entre la succión y la descarga del equipo de proceso, como podría ser un intercambiador de calor, un equipo de filtrado, un sistema de llenado de envases, en fin cualquier equipo que produzca una variación de presión y por lo tanto una resistencia al paso del fluido.

$$h_{equipo} = \frac{\Delta P}{\gamma} \quad (2.17)$$

2.3.4. Bombas centrífugas.

Las bombas son máquinas capaces de transformar energía mecánica en energía hidráulica mediante un elemento móvil llamado rodete o impulsor que gira dentro de una parte estática llamada carcasa o voluta. Su funcionamiento está basado en la ecuación de Euler y pertenecen al grupo de turbomáquinas rotodinámicas que se encargan de mover el fluido en las redes de flujo permitiendo la circulación, así como también que se alcance la disponibilidad requerida en un punto determinado del sistema. Es necesario que para introducir movimiento al fluido se le dé accionamiento mecánico al eje de la bomba, que está acoplado al impulsor o rodete; y de acuerdo al principio de impulso y cantidad de movimiento parte de la energía introducida al eje es traspasada al fluido mediante el paso del mismo por los álabes del impulsor.

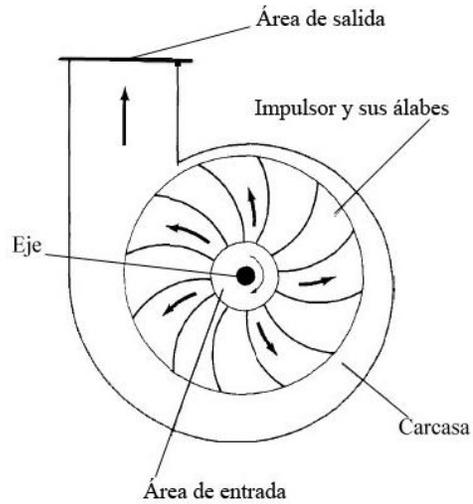


Figura 2.5 Traspaso de la energía desde la máquina al fluido. [18]

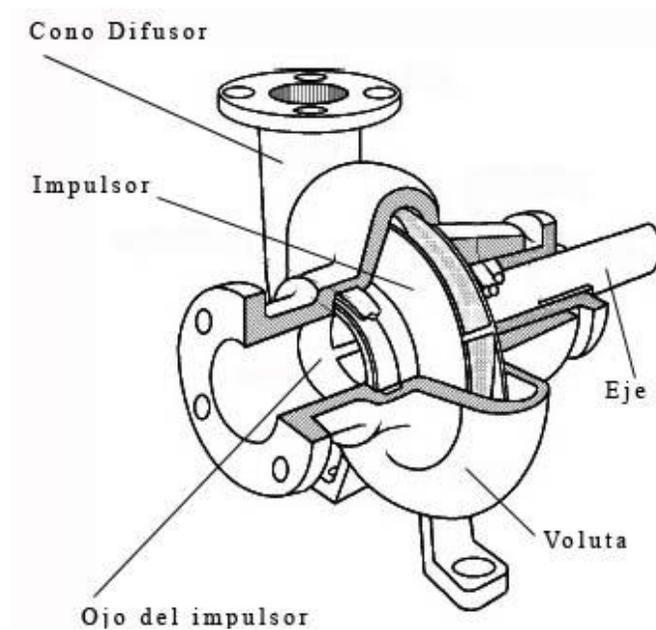


Figura 2.6 Principales partes de una bomba centrífuga. [18]

Entre los tipos de bombas utilizados más frecuentemente en el área industrial se encuentran las bombas centrífugas. En la figura 2.6 se pueden observar las principales partes de una bomba centrífuga. El fluido entra por el ojo del impulsor de manera axial, y cambia en dirección radial, mediante la forma de los álabes y la velocidad de giro del impulsor se aumenta la velocidad y la presión, (presión dinámica), del fluido.

CAPÍTULO II – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A la salida del impulsor, gran parte de la energía cinética, o velocidad del fluido se transforma en presión estática, mediante el paso del fluido por la parte estacionaria de la bomba llamada voluta, cuyo aumento progresivo de área transversal hace las veces de difusor; luego el fluido llega al cono difusor donde aumenta nuevamente la presión estática del fluido. La forma constructiva de la voluta y del cono difusor, permiten que esto suceda de acuerdo a la ecuación 2.6.

Al calcular las disponibilidades en las secciones transversales de la succión (s) y la descarga (d), se puede conocer la disponibilidad que debe entregar la bomba a la red de flujo, para vencer las restricciones de la succión y la descarga.

$$H_{bomba} = H_d - H_s \quad (2.18)$$

Mediante ensayos de laboratorio se puede obtener las curvas de comportamiento de una bomba (figura 2.7); disponibilidad, eficiencia, potencia y NPSHR en función del caudal. Estas curvas permiten hacer una selección de la bomba y al ser intersectadas con la curva del sistema se obtiene el punto de trabajo de la bomba. Por lo general estas curvas son proporcionadas por el fabricante.

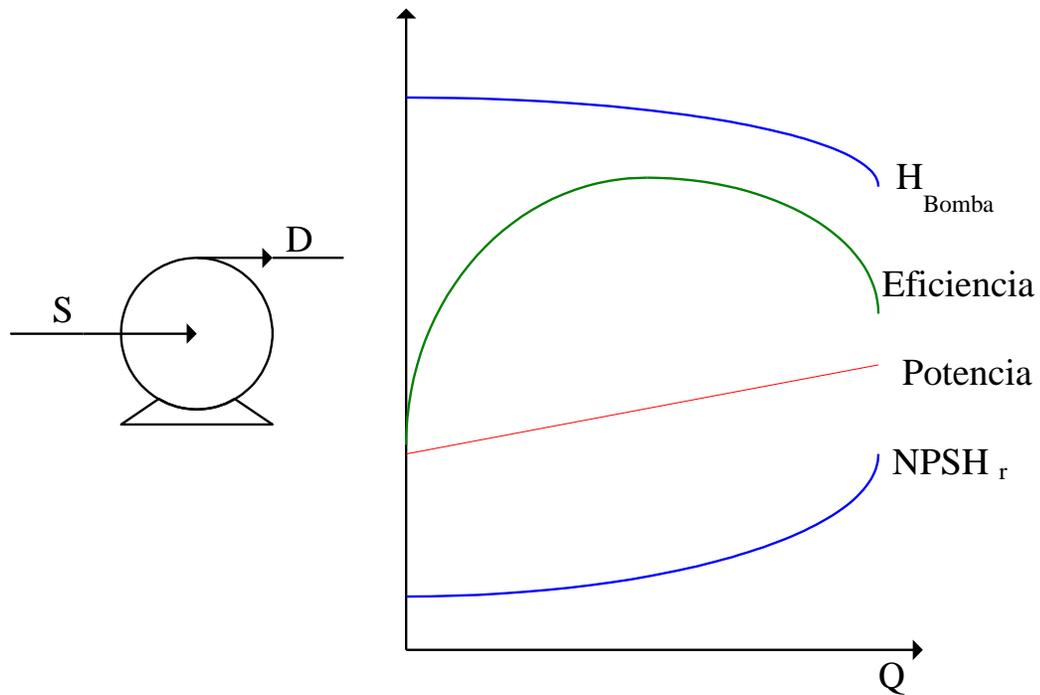


Figura 2.7 Representación física de una bomba y sus curvas de comportamiento.

El término $NPSH_r$ que se puede observar en la figura 2.7 corresponde al término Net positive suction head de su siglas en inglés, y es utilizado para determinar si existe o no cavitación en el punto de trabajo de la bomba. La cavitación es la disminución de la presión de succión hasta un valor menor al de la presión de vapor a la temperatura de bombeo, y por lo tanto comienzan a producirse pequeñas burbujas; al estas pasar a un nivel de presión mayor dentro de la bomba implotan generando ondas de choque localizadas, provocando perforaciones, erosión, y pérdida de rendimiento.

$$NPSHD = \frac{P_a - P_s}{\rho g} - h_{f_{\text{succión}}} \pm Z \quad (2.19)$$

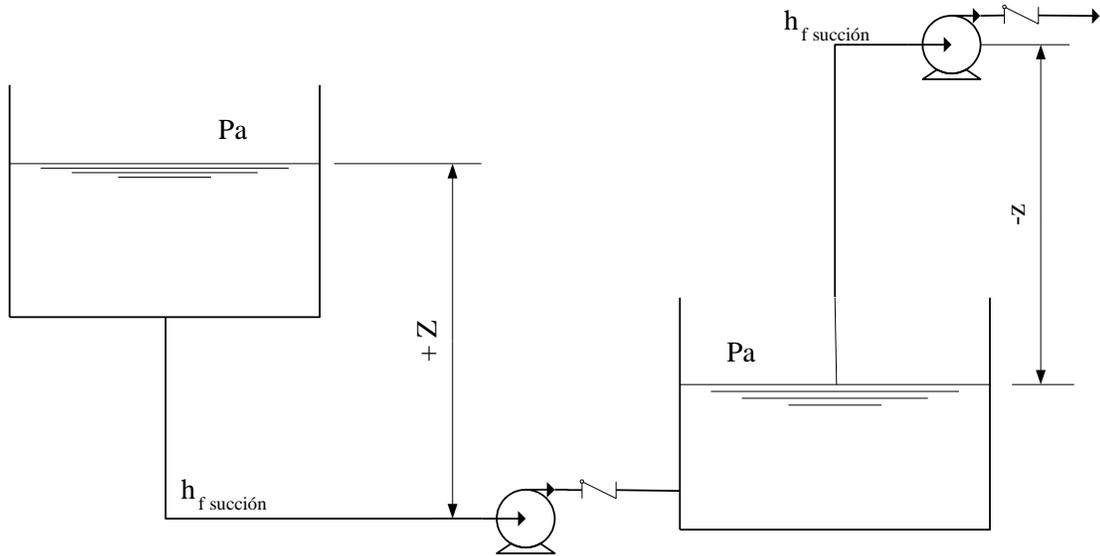


Figura 2.8 Posibles arreglos de sistemas de bombeo para estudio de cavitación. [7]

En la figura 2.8 se pueden observar los términos asociados a la ecuación 2.19, donde P_a es la presión absoluta de aspiración, bien puede ser presión atmosférica en tanques abiertos, presiones de vacío o presurizaciones en tanques cerrados. P_s es la presión de saturación a la temperatura de bombeo; h_f es la sumatoria de las pérdidas por fricción en el tramo de succión de la bomba; y Z es la cota o diferencia de altura entre el datum de la bomba y el nivel del líquido que se bombea, esta puede ser negativa o positiva dependiendo si el nivel se encuentra sobre (+) o por debajo (-) de la bomba.

$$NPSH_D \geq NPSH_R + f \quad (2.20)$$

De acuerdo a la ecuación 2.20, para verificar que no exista cavitación el valor de $NPSH_D$ (disponible) debe ser mayor que el $NPSH_R$ (requerido). Algunos fabricantes sugieren que se suma un factor de seguridad “f” al $NPSH_R$.

2.3.5. Fuentes y sumideros (tanques).

Otra parte fundamental de una red de flujo son las fuentes o reservorios (tanques), que pueden ser de dos tipos, los que se consideran ideales y los que no. Los tanques ideales tienen resistencia interna igual a cero y además su disponibilidad es constante en el tiempo. Este concepto de ideal, se aplica en casos donde la fuente o sumidero es lo suficientemente grande como para que la fricción de fluido con las paredes del mismo sea tan pequeña que pueda despreciarse; y donde la variación del nivel, o altura del fluido no varía, o que lo haga de una manera tan pequeña que pueda despreciarse.

2.4. ASPECTOS BÁSICOS DE DISEÑO Y CÁLCULO DE RECIPIENTES SOMETIDOS A PRESIÓN INTERNA.

Un recipiente se encuentra sometido a presión interna cuando esta excede la presión atmosférica. Estos recipientes se encuentran sometidos a diversas cargas a causa de éste exceso de presión y por el fluido que contienen, que causan esfuerzos de diferentes intensidades en los componentes del recipiente. La magnitud y la intensidad de estos esfuerzos es función de la naturaleza de las cargas de la geometría del recipiente y de su construcción. Los procedimientos y métodos de cálculo han sido establecidos por las normas ASME (American Society of Mechanical Engineers) sección VIII “Reglas para la construcción de recipientes sujetos a presión” (Code for pressure vessels) división 1. Dichas normas han sido utilizadas por el autor del libro “Manual de recipientes a presión, diseño y cálculo” Eugene Megyesy [10] y por el autor del trabajo de ascenso titulado “Diseño de recipientes a presión por construcción soldada” Carlos Rodríguez [15]. Ambas fuentes utilizadas como guía para la realización de este trabajo.

Al momento de comenzar el diseño se debe conocer la presión de operación del recipiente, esto se refiere a la a la cual trabaja normalmente éste y se denota con las letras P_o .

Luego se procede a calcular la presión de diseño P_d que es la presión que se emplea para el diseño del recipiente. Se recomienda hacer el diseño para una presión 30psi o 10 % mayor que la presión de operación, se debe tomar la mayor entre estos dos criterios, y se debe considerar la presión del fluido y de cualquier otra sustancia que sea contenida por el recipiente. Se calcula según las ecuaciones 2.21 o 2.22.

$$P_d = P_o + 30\text{psig} \quad (2.21)$$

$$P_d = P_o \cdot (1,1)\text{psig} \quad (2.22)$$

2.4.1. Formas y tipos de cabezales de recipientes sometidos a presión interna.

Existen múltiples formas geométricas con las que se pueden construir los recipientes a presión. Entre estas se encuentran los cabezales elipsoidales hemisféricos, y torisféricos, como se muestra en la figura 2.9

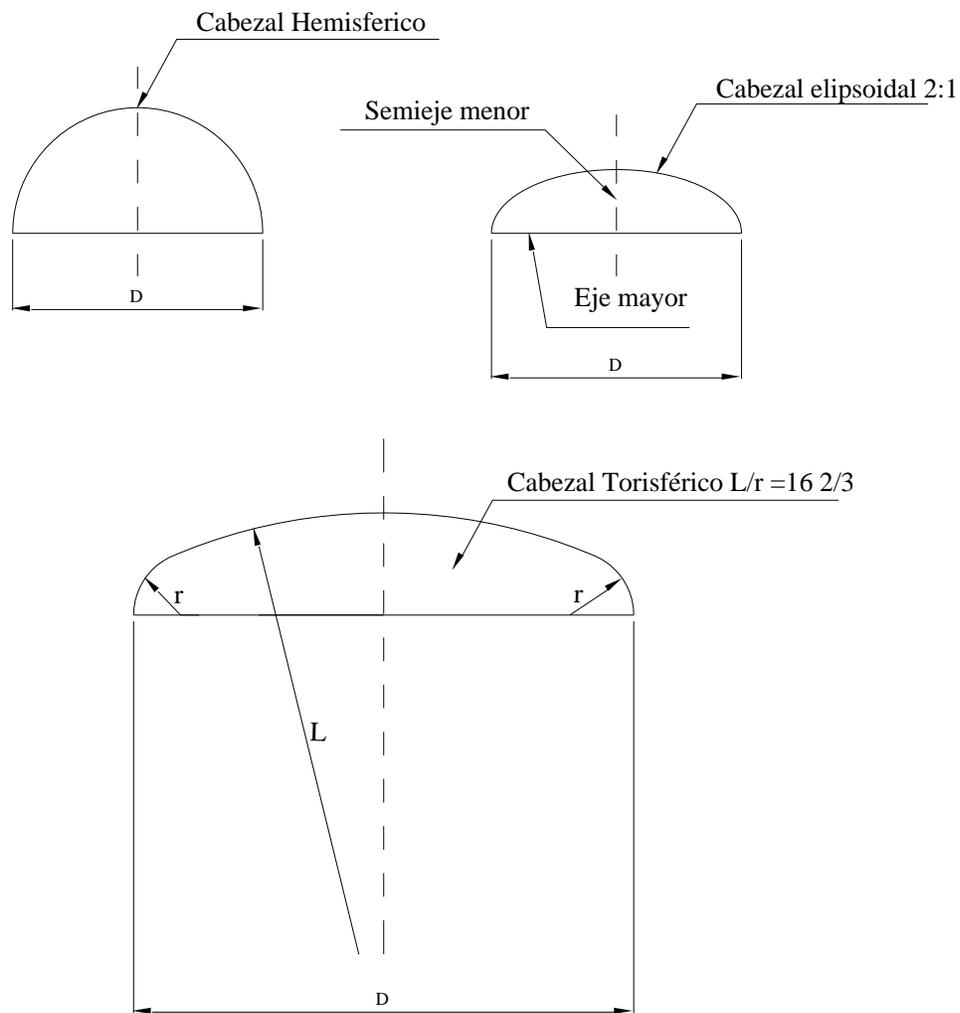


Figura 2.9 Tipos de cabezales en recipientes sometidos a presión interna.

El espesor de pared de los cabezales hemisféricos se calcula mediante la ecuación 2.23. Donde P_d es la presión de diseño, R es el radio interno del recipiente, S es el esfuerzo admisible del material del cabezal, y E es la eficiencia de la soldadura.

$$t = \frac{P_d \cdot R}{2 \cdot S \cdot E - 0,2P_d} \quad (2.23)$$

El espesor de pared de los cabezales elipsoidales de relación entre eje mayor y eje menor 2:1 se calcula mediante la ecuación 2.24. Donde P_d es la presión de diseño, D

es el diámetro interno del recipiente, S es el esfuerzo admisible del material del cabezal, y E es la eficiencia de la soldadura.

$$t = \frac{P_d \cdot D}{2 \cdot S \cdot E - 0,2P_d} \quad (2.24)$$

Para calcular el espesor de pared de los cabezales torisféricos existen dos ecuaciones la ecuación 2.25 y la ecuación 2.26. Su uso depende de la relación L/r, cuando esta relación es igual a 16 2/3 se utiliza la ecuación 2.25. Cuando esta relación es menor se utiliza la ecuación 2.26 donde “M” es un factor que depende de la relación L/r, P_d es la presión de diseño, L es el radio interior del cabezal, S es el esfuerzo admisible del material del cabezal, y E es la eficiencia de la soldadura.

$$t = \frac{0,885 \cdot P_d \cdot L}{2 \cdot S \cdot E - 0,2P_d} \quad (2.25)$$

$$t = \frac{P_d \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2P_d} \quad (2.26)$$

2.4.2. Cálculo de pared de casco cilíndrico de recipientes sometidos a presión interna.

En el caso de recipientes sometidos a presión interna por lo general rige el esfuerzo longitudinal para el diseño, debido a la presión uniforme induce sobre la costura un esfuerzo unitario igual al doble del que afecta a la costura circunferencial, debido a la geometría misma del cilindro. Las ecuaciones 2.27 y 2.28 permiten calcular el esfuerzo circunferencial y el longitudinal respectivamente. Los tipos de costura o cordón de soldadura se pueden observar en la figura 2.10.

$$S_1 = \frac{P \cdot D}{4 \cdot t} \quad (2.27)$$

$$S_1 = \frac{P \cdot D}{2 \cdot t} \quad (2.28)$$

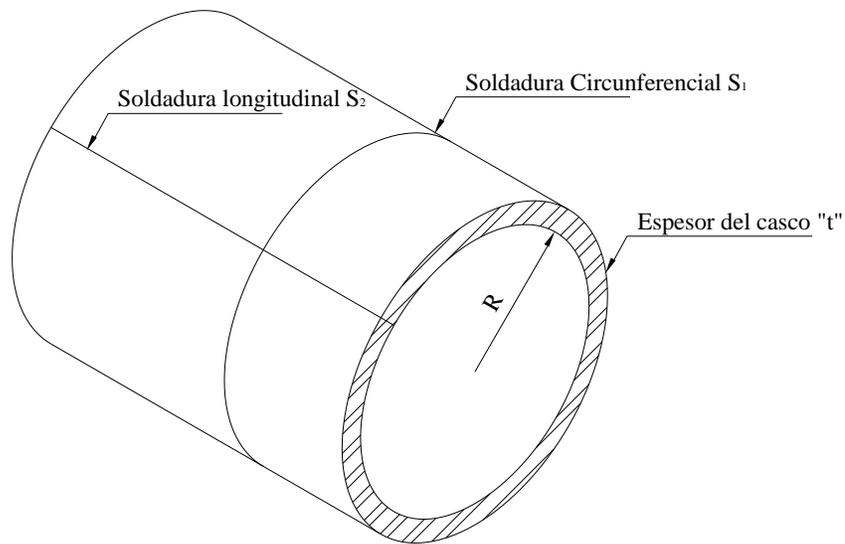


Figura 2.10 Cordón de soldadura longitudinal y circunferencial

Luego para determinar el espesor de pared de acuerdo a las dimensiones interiores del casco cilíndrico, se tiene la ecuación 2.29.

$$t = \frac{P_d \cdot R}{S \cdot E - 0,6P_d} \quad (2.29)$$

Y de acuerdo a las dimensiones exteriores se tiene la ecuación 2.30.

$$t = \frac{P_d \cdot R}{S \cdot E - 0,4P_d} \quad (2.30)$$

Donde t es el espesor en pulgadas de la pared, o del casco, R es el radio interno del tanque en pulgadas, S es el esfuerzo admisible a tensión del material en psi, y E es la eficiencia de la soldadura.

2.4.3. Accesorios de recipientes y otros elementos.

El faldón es el tipo de soporte mas comúnmente usado y el más satisfactorio para los recipientes verticales, normalmente se une en la cabeza del tanque por soldadura a tope; para calcular el espesor del faldón debe primero conocerse el peso total del tanque, incluyendo el fluido que se encuentra almacenado dentro del mismo. Por medio del faldón se hace la sujeción del recipiente a la estructura de soporte, por medio de pernos de anclaje.

Adicionalmente existen elementos como las bocas de visita que son utilizadas para realizar limpiezas e inspecciones de la superficie interna de los tanques. Existen además acoples con bridas, roscados o soldados que se añaden al recipiente para introducir o extraer el fluido, así como también instrumentos de medición y control.

Todos estos accesorios modifican la integridad del recipiente, y los esfuerzos que se producen, para lo cual se debe estar atento a las normas para hacer un diseño confiable y adaptado a los estándares internacionales de seguridad

2.5. ASPECTOS BÁSICOS DE DISEÑO Y CÁLCULO DE RECIPIENTES DE SECCIÓN RECTANGULAR.

Los tanques de paredes planas se utilizan únicamente para presiones hidrostáticas bajas, debido a que las aristas que se forman en la unión de las paredes se convierten en concentradores de tensiones, así como también sus paredes tienen a deformarse hacia el exterior debido a la presión del líquido, en general son mecánicamente débiles, haciendo necesario el uso de material extra para refuerzos, aunque su fabricación es más sencilla que los tanques cilíndricos, y aprovechan mejor el espacio haciéndolos elegibles para ciertas aplicaciones.

El autor del libro “Manual de recipientes a presión, diseño y cálculo” Eugene Megyesy [10], contempla en su obra el diseño de recipientes de sección rectangular sometidos sólo a la presión estática del fluido. Donde utilizó el criterio de la deflexión máxima permitida $\Delta = L/500$, en donde L es el lado mas largo de la placa.

Para determinar el espesor de las paredes laterales del recipiente debe utilizarse la ecuación 2.31.

$$t = 2,45 \cdot \sqrt{\frac{\alpha \cdot H \cdot 0,036 \cdot G}{S}} \quad (2.31)$$

Donde L es la longitud del lado más largo del tanque, H es la altura del tanque, G es la gravedad específica del fluido, S es el esfuerzo admisible a tracción del material y α se determina mediante la relación H/L y la gráfica de la figura 2.11.

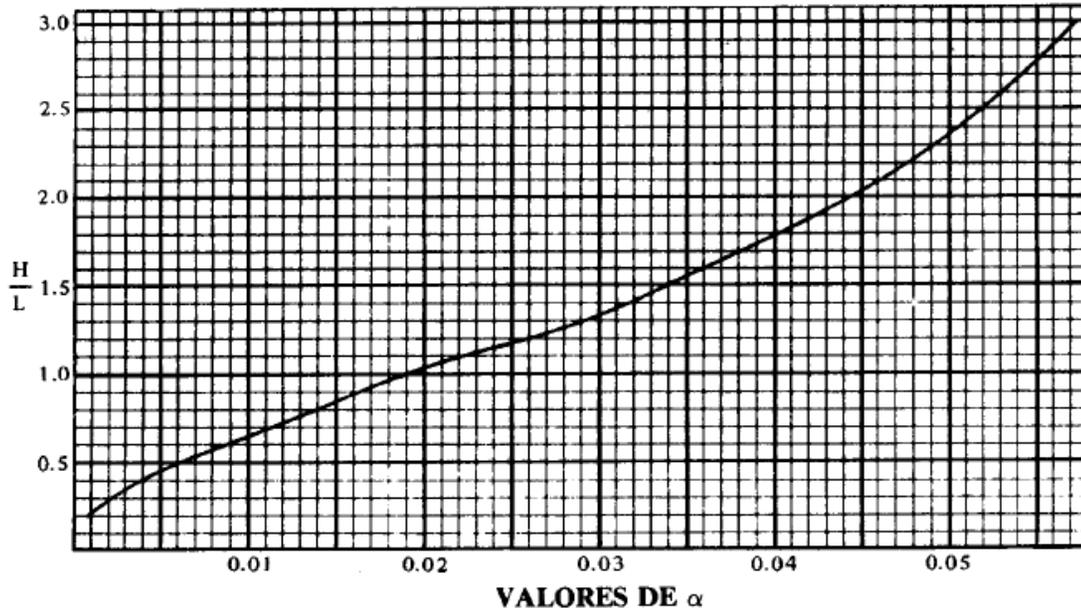


Figura 2.11 Valores de α en función de la relación H/L del tanque [10]

Luego para determinar el espesor de la placa de fondo se deben conocer los puntos de apoyo del tanque y la distancia entre los mismos, y se evalúa la ecuación 2.32 donde L' es la distancia entre los apoyos.

$$t_f = \frac{L'}{1,254 \cdot \sqrt{\frac{S}{0,036 \cdot G \cdot H}}} \quad (2.32)$$

En la figura 2.12 se observan las dimensiones a utilizar en las ecuaciones 2.31 y 2.31 para el diseño de tanques de sección rectangular.

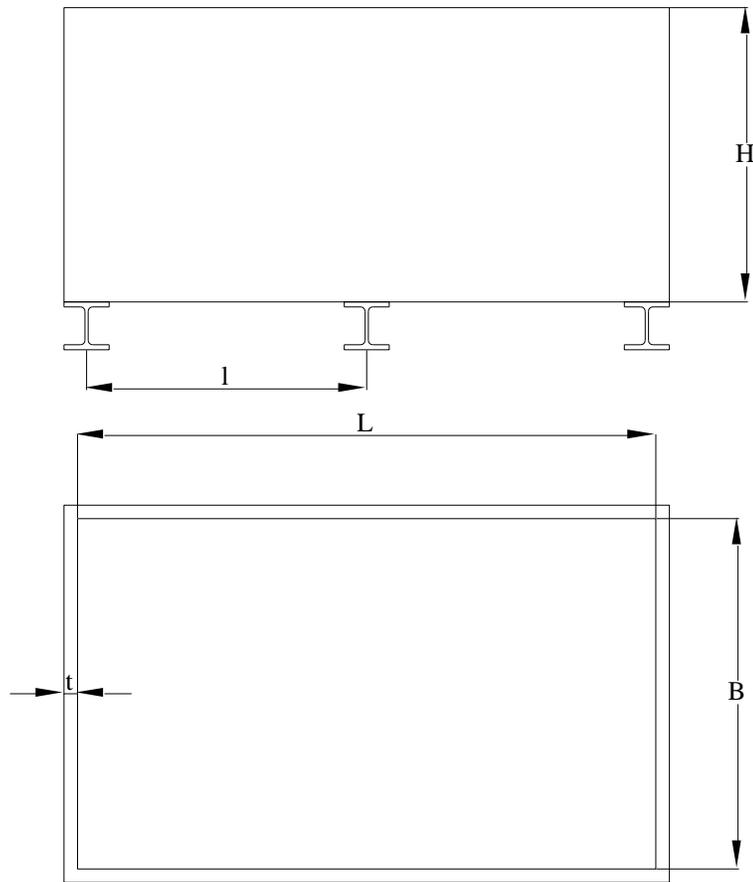


Figura 2.12 Dimensiones a utilizar para el diseño de tanques de sección rectangular.

Al igual que para el diseño de recipientes sometidos a presión interna, cualquier abertura o accesorio que se deba instalar en el tanque, debe ser diseñado de acuerdo a las normas, para procurar un diseño confiable.

CAPÍTULO III

Este capítulo establece el nivel de la investigación, y el diseño de la misma.

3.1. NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN.

Esta investigación ofrecerá el estudio detallado de una problemática existente en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, la cual será objeto de análisis de hechos reales, donde se sugerirá el estudio detallado de los objetivos que se persiguen en la asignatura de instrumentación industrial; el comportamiento de sistemas de control automático de variables, y el comportamiento de sistemas de transporte de fluidos e intercambio de calor, con el fin de poder fijar los parámetros necesarios para el diseño.

Es por ello que esta investigación es de tipo aplicada, ya que se basará en la búsqueda de la aplicación de los conocimientos adquiridos, estrechamente ligada a una investigación teórica previa. Además es de tipo descriptiva ya que se definirán diferentes aspectos que conforman la situación problemática actual. Y por último es correlacional y cualitativa debido a que en la búsqueda de las soluciones al problema planteado, se evaluarán los atributos de cada solución y se hará una comparación para determinar cuál es la más adecuada.

3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.

Para abordar el estudio es necesario realizar una investigación documental que aborde los tópicos involucrados en la comprensión absoluta de todos los aspectos asociados a la instrumentación industrial y sistemas de control automático de variables; de sistemas de transporte de fluido, o redes de flujo, y de equipos de intercambio de calor.

CAPÍTULO III – MARCO METODOLÓGICO

Posteriormente se realizará una investigación de las necesidades que existen en el laboratorio de instrumentación industrial para lograr los objetivos del curso planteados por la cátedra.

Al mismo tiempo se recolectará información acerca de sistemas existentes similares, para determinar la factibilidad de aplicación y de construcción, atendiendo a opiniones de la parte interesada, entiéndase los profesores que dictan clases de ésta cátedra, referentes a la capacidad y la distribución física del sistema a diseñar.

Toda la investigación teórica, de necesidades, y de sistemas similares, estará enfocada en establecer criterios y restricciones que permitan definir las características deseables de la alternativa de solución.

Luego se presentarán en forma preliminar distintas soluciones, las cuales se evaluarán tomando en cuenta los criterios y restricciones mencionados anteriormente, para proceder a la elección de la solución definitiva mediante una discusión general.

Se procederá a desarrollar la alternativa seleccionada. El diseño de la estructura se efectuará a través del método de los elementos finitos para la determinación de los esfuerzos estáticos. El diseño del sistema de control y automatización de variables se realizará planteando diagramas de tuberías e instrumentos (P&I D) y normas que determinarán la ergonomía, y ubicación física de los equipos. Otros componentes del sistema bombas, tanques, intercambiadores de calor, placas orificio, entre otros se diseñarán o seleccionarán atendiendo a los cálculos de ingeniería respectivos, con ayuda de herramientas computacionales.

Por último se realizará un análisis de costos, de construcción y puesta en marcha del sistema diseñado.

CAPÍTULO III – MARCO METODOLÓGICO

A lo largo de la realización de esta investigación se analizarán los resultados para establecer conclusiones a los objetivos planteados, y hacer las recomendaciones pertinentes.

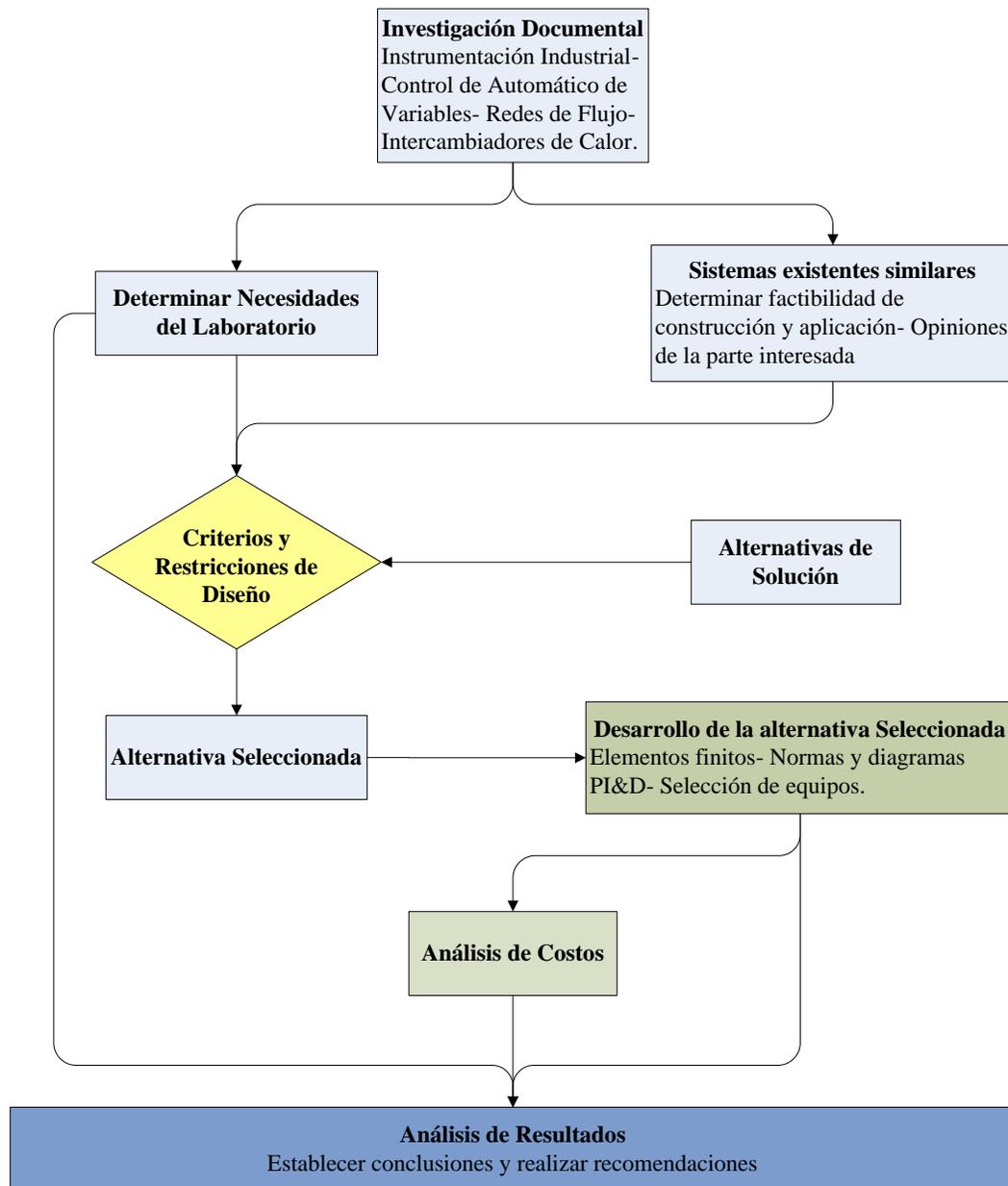


Figura 3.1 Diagrama de flujo del diseño de la investigación.

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

Para la determinación de las características fundamentales del sistema, la investigación en un principio incluirá entrevistas con profesores de la cátedra de instrumentación industrial de manera de conocer las carencias y las necesidades que existen en el laboratorio, y otras recomendaciones que podrían tener gran repercusión en el diseño final del sistema.

Por otra parte se recolectará información y datos del análisis documental relacionado con las bombas centrífugas, instrumentación industrial y sistemas de control automático de variables. Serán objeto de este análisis documental, libros de texto, tesis, normas, trabajos de ascenso, publicaciones en Internet, entre otros. Los instrumentos para esta recolección se basarán en almacenar todo el material bibliográfico y catálogos de equipos, a través de un computador para evaluarla con el fin de alcanzar los objetivos del proyecto.

3.4. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.

Toda la información adquirida será procesada de forma analítica, comparada y evaluada, de acuerdo a los criterios y restricciones establecidos para el diseño del sistema, criterios de ingeniería y criterios propios; para presentarla luego de manera resumida y poder plantear de forma precisa la mejor manera de alcanzar los objetivos.

CAPÍTULO IV

En este capítulo se presentan discusiones y planteamientos realizados durante el desarrollo de este trabajo, así como también cálculos de ingeniería y aplicación de criterios que sustentan el diseño realizado en función de los objetivos planteados en el capítulo I, y de acuerdo a la metodología planteada en el capítulo III.

4.1. NECESIDADES DEL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL DE ACUERDO A LOS OBJETIVOS DE LA ASIGNATURA.

Instrumentación Industrial, del octavo semestre de Ingeniería Mecánica, es de carácter teórico-práctico ya que se dictan clases teóricas de tipo magistral que se complementan con actividades prácticas en las instalaciones del Laboratorio de Automatización y Control de Ingeniería Mecánica. A continuación se presenta la información más resaltante del programa sinóptico de la asignatura, tanto la teoría como las sesiones de práctica en el laboratorio.

4.1.1. Objetivo general

Como objetivo general de la asignatura según el programa sinóptico, se plantea que.

“Al finalizar el curso, el estudiante habrá desarrollado capacidades y destrezas necesarias para comprender, usar y evaluar:

- a) Instrumentos de medición y control (incluye calibración, tipos de errores).
- b) Elementos medidores de: presión, nivel, temperatura y caudal.
- c) Diferentes símbolos y circuitos esquemáticos utilizados en la instrumentación industrial.”

4.1.2. Contenido

Para la parte teórica de la asignatura Instrumentación industrial se tiene previsto contemplar los siguientes aspectos generales y específicos de la instrumentación industrial y el control automático.

- a) Clasificación de los instrumentos empleados en procesos industriales.
- b) Definición de las características estáticas y dinámicas de los instrumentos empleados en procesos industriales.
- c) Estudio de la simbología utilizada para representar instrumentación en planos de procesos.
- d) Estudio de la instrumentación utilizada para la medición de las variables: presión, temperatura, nivel y caudal.
- e) Estudio de las válvulas de control.
- f) Estudio de los controladores en sistemas con regulación automática.

En la parte práctica de la asignatura Instrumentación industrial se desarrollan las siguientes experiencias

- a) Lectura e Interpretación de planos de Tubería e Instrumentación.
- b) Identificación y descripción de las características de los instrumentos.
- c) Estudio de la constante de tiempo de un termómetro de vidrio.
- d) Medición de temperatura mediante termopares.
- e) Calibración de un indicador registrador de presión.
- f) Calibración de un transmisor neumático de presión.
- g) Estudio de diversos sistemas de control existentes.

CAPÍTULO IV – DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA PLANTEADO

A continuación, en la tabla 4.1 se presenta el resumen de las actividades de laboratorio, sus objetivos generales, y las actividades que se desarrollan en la realización de cada experiencia práctica.

*Tabla 4.1 Actividades del laboratorio de Instrumentación Industrial
[Fuente: Jefe de Cátedra de Instrumentación Industrial].*

Renglón	Descripción
Nombre	Práctica 1. Lectura e Interpretación de Planos de Tubería e Instrumentación.
Objetivo	Realizar la interpretación e identificación de la información presente en un plano DTI basado en norma ISA.
Actividades	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de 2 lazos en cadena abierta en un plano DTI. • Identificación de 2 lazos en cadena cerrada en un plano DTI.
Nombre	Práctica 2. Identificación y descripción de las características de los instrumentos.
Objetivo	Realizar la identificación y descripción de las características de los instrumentos.
Actividades	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación las características funcionales de un instrumento en un DTI. • Levantamiento de las características técnicas de un instrumento mediante el uso de hojas en formato ISA.
Nombre	Práctica 3. Calibración de Indicadores y Registradores mecánicos de presión.
Objetivo	Realizar la calibración de un instrumento indicador y registrador de presión.
Actividades	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de los elementos funcionales de un indicador registrador de presión. • Calibración de un instrumento indicador registrador de presión.

CAPÍTULO IV – DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA PLANTEADO

*Tabla 4.1 (Continuación) Actividades del laboratorio de Instrumentación Industrial
[Fuente: Jefe de Cátedra de Instrumentación Industrial].*

Renglón	Descripción
Nombre	Práctica 4. Constante de tiempo de un Termómetro de bulbo con mercurio.
Objetivo	Determinar el tiempo de respuesta de un termómetro de bulbo con mercurio.
Actividades	<ul style="list-style-type: none"> • Determinación de la expresión teórica que rige el comportamiento de un termómetro de vidrio como sistema de primer orden. • Determinación experimental de la constante de tiempo de un termómetro de bulbo con mercurio.
Nombre	Práctica 5. Medición de temperatura con termopares.
Objetivo	Determinar la temperatura medida en un horno mediante el uso de distintos termopares.
Actividades	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio del circuito equivalente de un sistema de medición con termopares. • Evaluación del comportamiento de las medidas al utilizar varios tipos de termopares para determinar una temperatura específica.
Nombre	Práctica 6. Estudio práctico de un Instrumento Transmisor de Equilibrio de Momentos.
Objetivo	Realizar la calibración de un instrumento transmisor neumático de presión diferencial o manométrica de equilibrio de momentos.
Actividades	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de los elementos funcionales de un transmisor neumático de presión diferencial o manométrica de equilibrio de momentos. • Ajuste del transmisor de equilibrio de momentos para unas condiciones de operación dadas.

*Tabla 4.1 (Continuación) Actividades del laboratorio de Instrumentación Industrial
[Fuente: Jefe de Cátedra de Instrumentación Industrial].*

Renglón	Descripción
Nombre	Práctica 7. Estudio de diversos Esquemas de Control.
Objetivo	Interpretar el comportamiento de los sistemas de control en un proceso simulado mediante software.
Actividades	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de las características de un sistema de control por retroalimentación en modo TODO-NADA (ON-OFF). • Identificación de las características de un sistema de control por retroalimentación en modo PID.

4.1.3. Análisis de los objetivos y temas propuestos para la asignatura y las necesidades del laboratorio

Se ha destacado el carácter teórico-práctico de la asignatura instrumentación industrial, por lo tanto es necesario comparar de forma objetiva el contenido de la asignatura con su complemento práctico en el laboratorio. De esta manera se pueden determinar las necesidades y las carencias que existen en el laboratorio.

A continuación en la tabla 4.2 se muestra una comparación del contenido de la asignatura, con los equipos existentes en el laboratorio.

Tabla 4.2 Tabla comparativa del contenido de la asignatura con los equipos de laboratorio.

Contenido de la asignatura	Actividades de laboratorio asociadas
Estudio de lazos de control.	No existe ningún lazo de control físicamente en el laboratorio.
Clasificación de instrumentos de control, según su función, variable medida, y señal de transmisión.	Existen registradores de presión, manómetros, y transmisores de presión diferencial, válvulas de control, todos mecánicos o neumáticos. También hay termopares de varios tipos.
Lectura y realización de Diagramas de tuberías e instrumentación.	Se analizan diagramas de procesos de plantas industriales para efectuar la lectura.
Definición de las características estáticas y dinámicas de los instrumentos	Se utilizan manuales y hojas técnicas de instrumentos que no existen en físico en el laboratorio, y las hojas se llenan de acuerdo a un sistema de ejemplo que opera a condiciones establecidas por el profesor.
Calibración de instrumentos, neumáticos, electrónicos y digitales.	Se calibra un indicador registrador mecánico de presión.
Estudio de la instrumentación para medición de variables: Nivel, presión, flujo y temperatura.	Actualmente sólo existen indicadores registradores de presión, manómetros, transmisores neumáticos de presión diferencial y termopares de varios tipos.

Tabla 4.2 (Continuación) Tabla comparativa del contenido de la asignatura con los equipos de laboratorio.

Contenido de la asignatura	Actividades de laboratorio asociadas
Estudio de las válvulas de control.	Existen válvulas de control neumáticas, en avanzado estado de deterioro.
Estudio de controladores en sistemas de regulación automática, y esquemas de control	Se identifican las características de sistemas de control, a través de la simulación de un proceso en la versión demostrativa de un programa de computadora, de sistemas SCADA.

Se puede notar la carencia que existe en el laboratorio de tecnología variada y actualizada. Además, la ausencia física de un lazo de control conformado que pueda ser observado, analizado y estudiado; repercute en la asimilación de algunos de los primeros contenidos que se desarrollan en la teoría de instrumentación industrial. A pesar de que los principios de funcionamiento, características, y definiciones asociadas a la tecnología existente se mantiene al pasar del tiempo, se requiere la infraestructura que permita relacionar lo aprendido, con equipos actualizados

La necesidad más resaltante es la de acercar a los estudiantes a un sistema de control de un proceso real, con el que se pueda interactuar y que cuente con una diversidad de instrumentos, que involucre más variables de medida, y que cuente con varios esquemas de control.

4.2. CRITERIOS Y RESTRICCIONES PARA EL DISEÑO

Las especificaciones de diseño permitirán que el sistema diseñado satisfaga con la mayor cantidad de necesidades existentes, y definirán los lineamientos para determinar y evaluar cuál, de las posibles soluciones planteadas es la que mejor se adapta o resuelve el problema planteado.

4.2.1. Criterios

A continuación se muestra la lista de criterios para el diseño de la planta piloto.

- a) Seguridad de operación.
- b) Facilidad de construcción.
- c) Facilidad y menor frecuencia de limpieza y mantenimiento.
- d) El menor costo proyectado del diseño.
- e) Ergonomía.

4.2.2. Restricciones

A continuación se muestra la lista de restricciones para el diseño de la planta piloto.

- a) El sistema debe funcionar con agua, electricidad y aire comprimido que son suministrados al laboratorio.
- b) El sistema no debe ocupar un área mayor a 6m^2 .
- c) El sistema debe permitir una cantidad de operarios igual o menor a 8 personas.
- d) El sistema debe permitir la manipulación de las 4 variables individualmente, o de manera simultánea

4.3. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN.

Las distintas alternativas de solución utilizarán agua como fluido de trabajo, por lo cual se necesitan tanques, un sistema de bombeo, una red de tuberías y sus accesorios. Los tanques mantendrán una cantidad de líquido fija disponible para la operación de la bomba, evitándose también el desperdicio de agua mediante su recirculación a través del sistema. Además se incluyen lazos de control de distintas variables, como lo son: nivel, presión, temperatura y flujo. Las alternativas difieren respecto a la distribución y cantidad de tanques, equipos, cantidad y complejidad de los lazos de control.

4.3.1. Módulos de control de variables.

En la figura 4.1 se observa el esquema de un sistema constituido por módulos, cuyas juntas permitirán insertar, retirar o realizar distintos arreglos. Existirá un módulo para medición y control de nivel (tanques 1 y 2), de flujo, temperatura (tanque 3) y de presión (tanque 4), La bomba también podrá ser colocada donde se necesite, para darle continuidad al proceso. El agua cae del tanque 1 al tanque 2 por gravedad y se controlará el nivel del primero. En el módulo de flujo se controlará la cantidad de flujo que circula por el tramo. El módulo de temperatura o tanque 3 permitirá mantener la temperatura del agua constante. El tanque 4 se mantendrá a presión constante y su fluido de trabajo será aire, que se utilizará para presurizar el tanque 1.

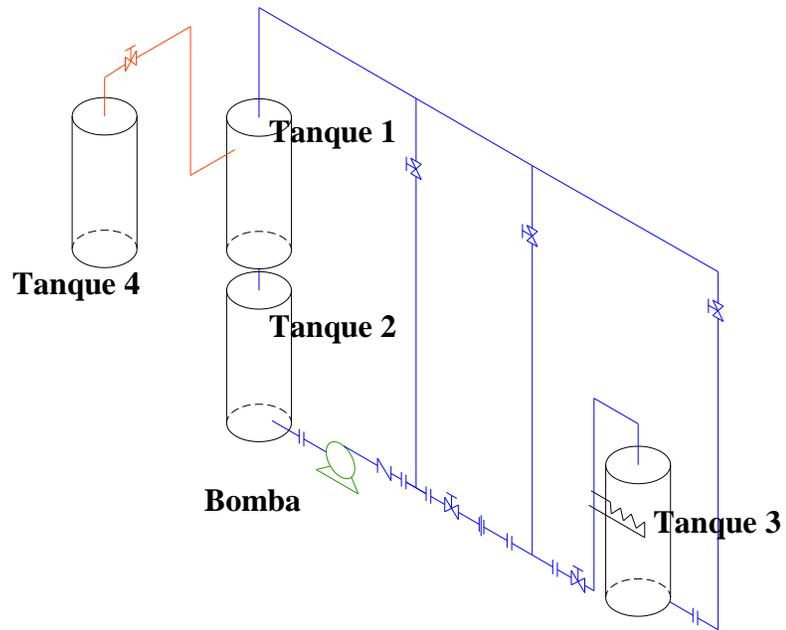


Figura 4.1 Módulos de control de variables.

En la figura 4.2 se muestra el diagrama de tuberías e instrumentación de esta alternativa de solución.

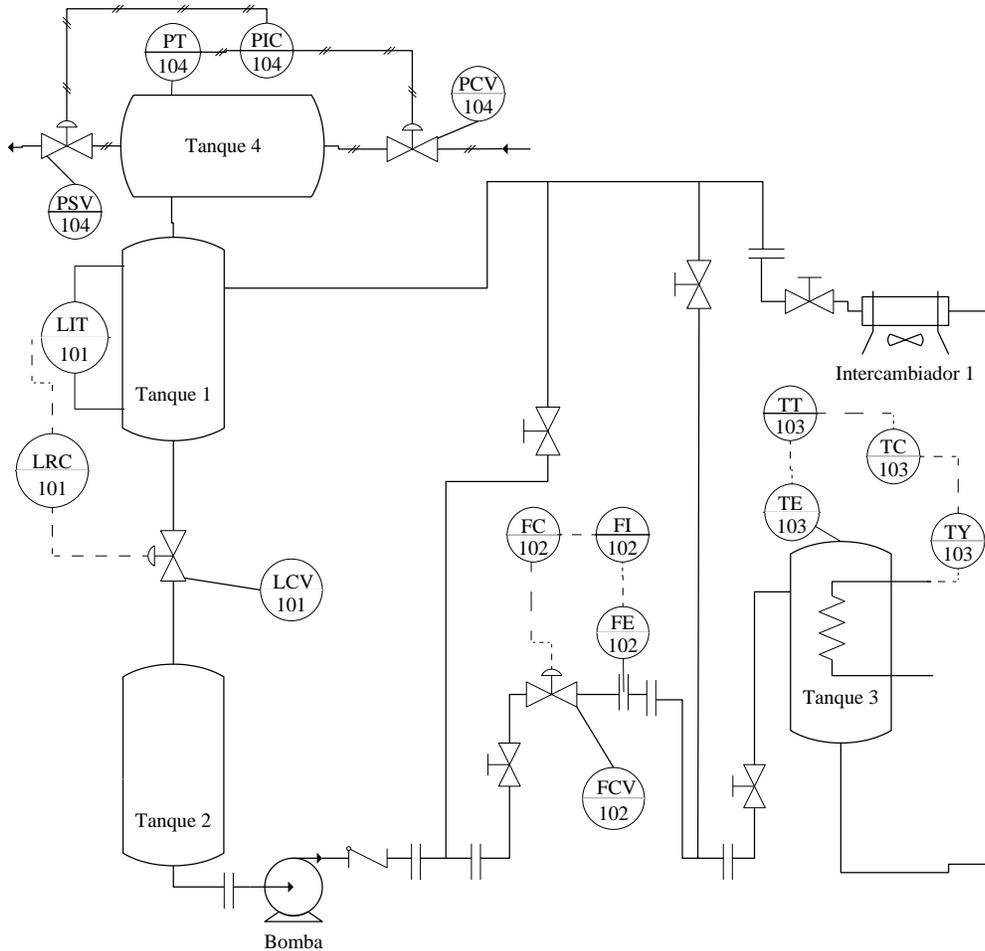


Figura 4.2 Diagrama P&I de los módulos de control de variables

4.3.2. Arreglo de 2 tanques y un intercambiador de calor

En la figura 4.3 se muestra el esquema de un sistema de dos tanques cilíndricos, uno colocado de manera vertical identificado como tanque 1, al que se le controlará el nivel y se mantendrá presurizado, y el tanque 2 ubicado en la parte superior dispuesto horizontalmente que se llenará con agua fría o caliente mediante un control de temperatura que permitirá el paso del agua, bien sea por el calentador de agua (intercambiador) o por la tubería de agua a temperatura ambiente. El agua se moverá en sentido de tanque 1 a tanque 2 mediante el uso de una bomba centrífuga que proporcionará la disponibilidad necesaria para esa tarea. Luego el agua caerá del

la bomba. La figura 4.6 muestra el diagrama de tuberías e instrumentación de este arreglo de tanques

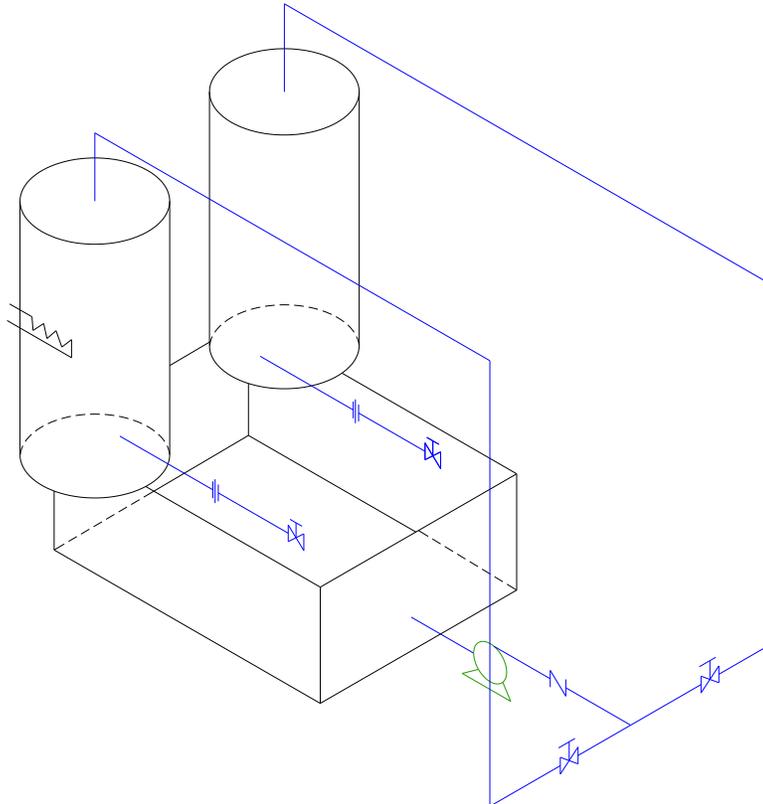


Figura 4.5 Arreglo de dos tanques cilíndricos y un tanque de sección transversal rectangular.

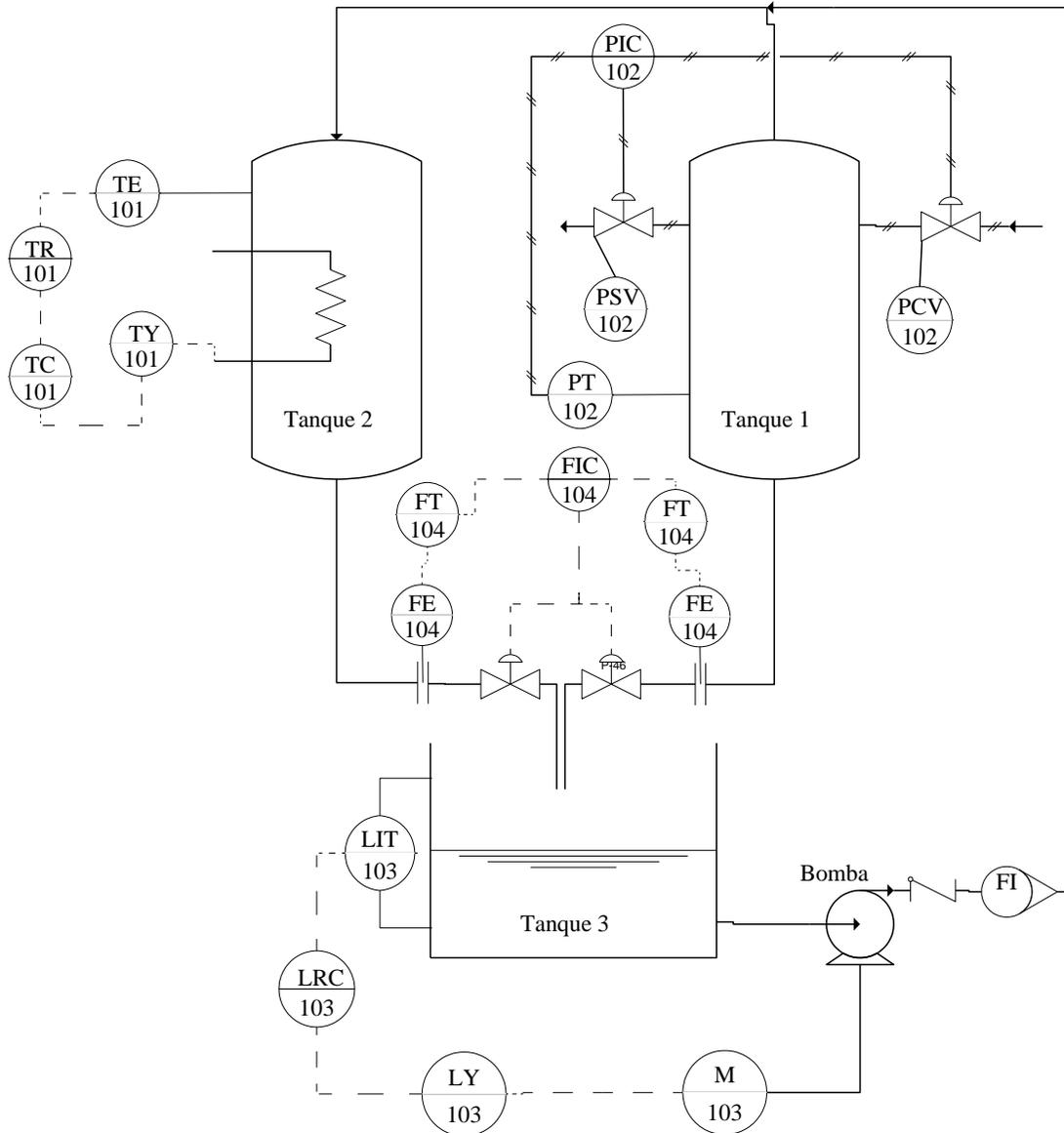


Figura 4.6 Diagrama P&I del arreglo de dos tanques cilíndricos y un tanque de sección transversal rectangular.

4.3.4. Arreglo de tres tanques cilíndricos

En la figura 4.7 el tanque 2 se encuentra presurizado, el agua cae por gravedad hacia el tanque 3 manteniendo este flujo constante mediante el control. En el tanque 3 la temperatura del agua es regulada mediante el ajuste de la corriente que circula a

través de una resistencia eléctrica. Cuando el líquido contenido en el tanque 1 llegue a un nivel mínimo la bomba succionará agua desde el tanque 3 y la descargará al tanque 1. Al alcanzarse el nivel máximo en el tanque 1, la bomba comenzaría a succionar el líquido desde el tanque 1 y lo descargaría en el tanque 2. En la figura 4.8 muestra el diagrama de tuberías e instrumentación de está alternativa de solución.

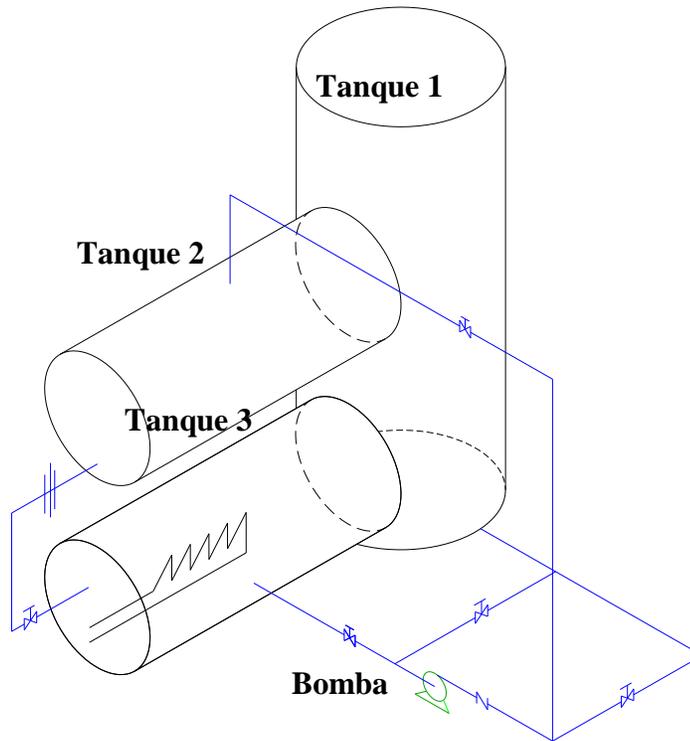


Figura 4.7 Arreglo de tres tanques cilíndricos.

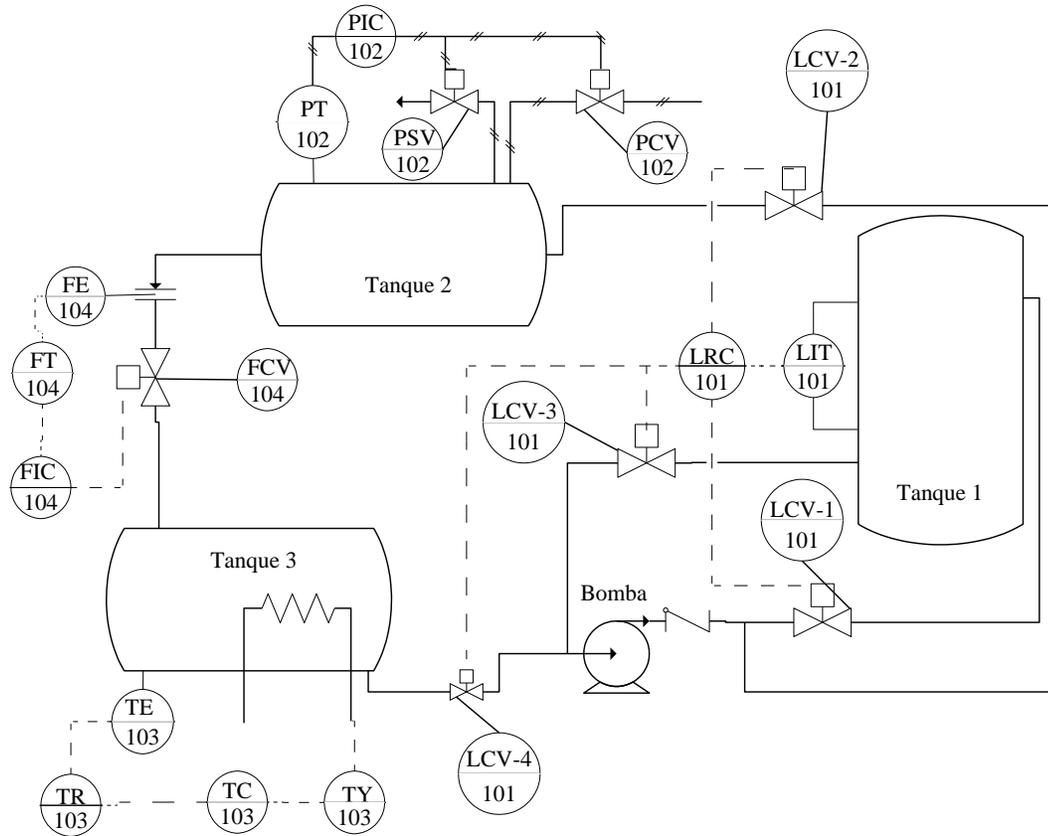


Figura 4.8 Diagrama P&I del arreglo de tres tanques cilíndricos

4.4. DISCUSIÓN Y SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA

Para seleccionar la mejor alternativa de solución, es necesario evaluar todas las posibles soluciones, exponiendo sus ventajas y desventajas en una primera etapa, y luego profundizando más, utilizando como apoyo las bases y los conocimientos adquiridos durante el transcurso de la formación académica. Además, se incluirán las opiniones de personas con experiencia en el diseño de sistemas de control automático de variables.

Un sistema seleccionado para cualquier aplicación, siempre debe cumplir con la función para la cual fue creado, pero además debe ser el más eficiente en desempeñar dicha tarea. La eficiencia en este caso se entiende como la mejor combinación de

características necesarias para cumplir un objetivo, utilizando la menor cantidad de recursos para llevarlo a cabo. Es por ello que resulta de gran importancia tener diferentes puntos de vista para la solución de un problema, en este caso, estos puntos de vista se manifiestan a través de las alternativas de solución.

Un buen diseño mecánico debe poseer la menor cantidad de partes móviles en la medida de lo posible, ya que este aspecto afecta proporcionalmente algunas características determinantes del mismo, como lo son: la complejidad del sistema (estrechamente relacionada con el costo de fabricación), la propensión del mismo a fallas; el costo de mantenimiento (es necesario guardar mayor cantidad de repuestos en el caso de los diseños más complejos), así como el grado de adiestramiento que deben tener los operarios y técnicos de mantenimiento o reparaciones.

En este sentido se puede determinar que la propuesta de “módulos de control de variables” (figuras 4.1 y 4.2) resulta poco eficiente. Ya que, posee una gran cantidad de piezas que se pueden instalar o desinstalar; esto significa un mayor desgaste en las juntas (bridas y roscas de las tuberías, conexiones electrónicas y neumáticas), y pérdidas de líquido durante el funcionamiento, que se agrava al tomar en cuenta que se calienta el agua y se presuriza un tanque; convirtiéndose en un factor de riesgo. El hecho de que puedan agregarse o retirarse módulos, o cambiar su posición, aumenta la complejidad del diseño y la construcción del mismo. Además, el tiempo de puesta a punto de esta alternativa en comparación con las demás es mucho mayor, tomando en cuenta que se debe realizar la instalación y sus chequeos posteriores, y por último lograr la estabilización del proceso, y el sistema de medición y control. Su ventaja es que se puede enfocar el estudio por variables, o todas las variables de manera simultánea, y la versatilidad de crear distintos procesos que se pueden controlar.

El “arreglo de tres tanques cilíndricos” (figura 4.7 y figura 4.8) presenta una gran complejidad de diseño y construcción de la regulación del nivel de los tanques 1 y 3.

En este diseño se utilizan casi el doble de válvulas de control que en el resto de las posibles soluciones, incluso una más que en los “módulos de control de variables”, lo que obviamente aumenta los costos del proyecto. La distribución de las tuberías y el diseño de los soportes para las mismas, será otro factor de complejidad en el diseño; aunque con la distribución de los tanques se aprovecha el espacio físico disponible.

Los diseños “arreglo de dos tanques y un intercambiador de calor” (figuras 4.3 y 4.4) y “arreglo de dos tanques cilíndricos y un tanque de sección transversal rectangular” (figuras 4.5 y 4.6) son los que presentan menor complejidad de diseño, y cuya construcción sea probablemente mas sencilla que la de las otras dos alternativas. La alternativa de los dos tanques cilíndricos y un tanque de sección transversal rectangular presenta mejor ergonomía que la de los dos tanques cilíndricos y dos intercambiadores de calor ya que el panel de control puede colocarse fácilmente como cortina entre los tanques 1 y 2 que son los que representan riesgos, y los usuarios, además que se aprovecha mucho mejor el espacio. Estos dos últimos diseños utilizan variadores de frecuencia para manipular el giro del motor de la bomba, esto puede aumentar el costo del proyecto. La mayor ventaja que presenta la alternativa de los 2 tanques cilíndricos y el tanque de sección transversal rectangular, es que tiene un tanque para cada lazo de control, aunque pudiera significar una mayor necesidad de espacio, también significa que no se sobrecarga ningún tanque con instrumentos de medición, haciendo que sea mas fácil de mantener, limpiar, y construir.

Las ventajas y desventajas de los sistemas serán expuestas en las tablas 4.3 y 4.4, respectivamente.

Tabla 4.3 Comparación de las ventajas de cada alternativa.

Nº	Alternativa de Solución	Ventajas
1	Módulos de control de variables	<ul style="list-style-type: none"> • Se puede enfocar el estudio por variables, o todas las variables de manera simultánea. • Versatilidad de crear distintos procesos que se pueden controlar.
2	Arreglo de dos tanques y dos intercambiadores de calor	<ul style="list-style-type: none"> • Sencillez diseño y construcción.
3	Arreglo de dos tanques cilíndricos y un tanque de sección transversal rectangular.	<ul style="list-style-type: none"> • Sencillez diseño y construcción. • Mayor ergonomía y aprovechamiento del espacio físico. • Facilidad de mantenimiento.
4	Arreglo de tres tanques cilíndricos	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor ergonomía y aprovechamiento del espacio físico.

Tabla 4.4 Comparación de las desventajas de cada alternativa.

Nº	Alternativa de Solución	Desventajas
1	Módulos de control de variables	<ul style="list-style-type: none"> • Complejidad del diseño y construcción. • Mayor cantidad de piezas. • Mayor desgaste de las conexiones de tubería, eléctricas y neumáticas. • Más y Posibles riesgos en el funcionamiento. • Tiempo de puesta a punto mayor.
2	Arreglo de dos tanques y dos intercambiadores de calor	<ul style="list-style-type: none"> • No se aprovecha al máximo el espacio disponible. • Uso de variadores de frecuencia.
3	Arreglo de dos tanques cilíndricos y un tanque de sección transversal rectangular.	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de variadores de frecuencia.
4	Arreglo de tres tanques cilíndricos	<ul style="list-style-type: none"> • Complejidad del diseño y construcción. • Mayor cantidad de piezas.

Al comparar las diferentes alternativas de solución con los criterios de diseño adoptados, y las ventajas y desventajas de cada una se puede concluir que el diseño llamado “Dos tanques cilíndricos y un tanque de sección transversal rectangular” (figuras 4.5 y 4.6) es la más apropiada para dar solución al problema planteado. Este

sistema presenta la mayor cantidad de ventajas y la menor cantidad de desventajas respecto al resto, y el posible riesgo puede ser fácilmente evitado ya que existiría un escudo entre los usuarios y el elemento de riesgo, haciendo posible disminuir aún más sus desventajas.

En cuanto a las restricciones de diseño, puede decirse que todos los sistemas cumplirían. Todos son fácilmente adaptables para que usen los suministros de agua, electricidad y aire comprimido del laboratorio y pueden manipularse las variables individualmente o de manera simultánea. Todas las alternativas pueden adaptarse al espacio físico disponible y a la cantidad de operarios, excepto la alternativa de módulos de control de variables, que podría representar un mayor desafío para lograrlo.

Analizando un poco más la alternativa seleccionada se puede decir que su mantenimiento es sencillo, debido a que no posee demasiados elementos móviles (válvulas de control, motor y bomba), y que al igual que en el resto de las alternativas debe considerarse el uso de anticorrosivos. Por la distribución de sus tuberías y tanques, además de aprovecharse el espacio disponible, es posible decir que el diseño de la estructura de soporte es mucho más sencillo, y de construcción más simple.

4.5. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN SELECCIONADA.

En la alternativa seleccionada el tanque 3 (ver figuras 4.5, 4.6 y 4.9) contará con refuerzos estructurales que permitan que los tanques 1 y 2 sean colocados sobre éste. Además el tanque será sujetado sobre una estructura que funcione como soporte de todo el sistema.

CAPÍTULO IV – DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA PLANTEADO

A esta estructura principal se le añadirán los soportes para las tuberías, instrumentos y el panel de control.

El sistema contará con los dispositivos de seguridad pertinentes al uso de tanques a presión, y manipulación líquidos calientes, además de todos los que se requieran de acuerdo a normas de seguridad; teniendo en cuenta que no solo se debe garantizar la seguridad de los usuarios sino también de los equipos.

Se utilizará tecnología neumática eléctrica y digital, de manera de poder controlar las variables de forma remota con un sistema de adquisición de datos (SAD), sin dejar a un lado ninguna de las otras alternativas de control.

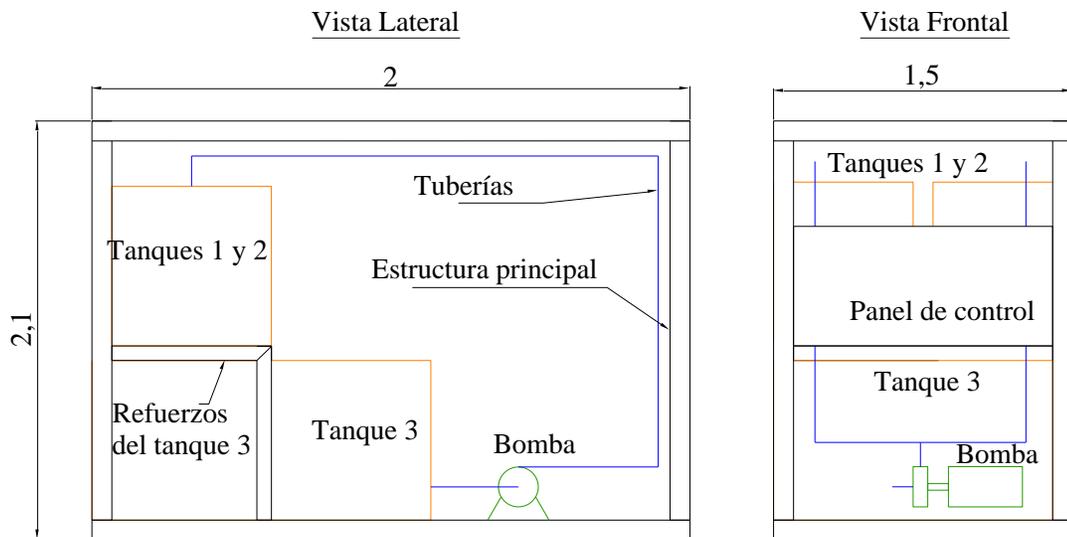


Figura 4.9 Esquema preliminar de la alternativa de solución seleccionada.

Cabe destacar que algunas de las dimensiones y proporciones podrían variar durante las posteriores etapas del diseño, y de ahí el calificativo de “preliminar” al esquema de la figura 4.9.

4.6. DISEÑO DEL SISTEMA HIDRÁULICO.

A continuación se muestran los resultados de los cálculos realizados para la selección y diseño de cada uno de los elementos que componen el sistema hidráulico.

La tabla 4.5 muestra algunas propiedades del agua a diferentes temperaturas, estas propiedades serán utilizadas en algunos de los cálculos.

Tabla 4.5 Algunas propiedades del agua a diferentes temperaturas. [6]

Temp. (°C)	Volumen específico m ³ /kg	Gravedad específica			Peso específico kN/m ³
		4	15.5	21.11	
25	0.00100	0,998	0,999	0,999	9,788
30	0.00101	0,995	0,996	0,997	9,770
60	0,00102	0,983	0,985	0,986	9,643

4.6.1. Diseño del tanque 1.

El tanque 1 se utilizará para contener agua que será presurizada, introduciendo aire a presión al tanque, y existirá un sistema de control que se encargará de mantener constante el valor de la presión. Para el diseño de este tanque se establecieron las especificaciones mostradas en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Especificaciones de diseño para el tanque 1.

Parámetro	Valor del parámetro
Temperatura de trabajo	30 °C
Diámetro	0,8 m
Altura	0,8 m
Presión de operación	551,58 kPa
Volumen total del tanque	m ³

CAPÍTULO IV – DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA PLANTEADO

Se procede a calcular la presión de diseño de acuerdo a la ecuación 2.21, obteniéndose

$$P_d = 80 + 30 \text{psig} = 110 \text{psig} = 758,42 \text{kPa} \quad (4.1)$$

Para determinar el espesor del casco cilíndrico del tanque deben considerarse el material de construcción, la eficiencia de la soldadura, y el radio interno del tanque, y se calcula de acuerdo a la ecuación 2.29.

El material seleccionado para la construcción del tanque es el acero ASTM SA-283 grado C, que tiene una resistencia admisible a la tracción de 12.700psi o 87,56 MPa, Su uso es recomendado por la norma, para tanques que almacenen sustancias inocuas, que la temperatura de aplicación se encuentre entre el rango de temperaturas de -28.9°C a 343°C , y cuyo espesor de pared no exceda $5/8$ de pulgada o 15,87mm. La eficiencia de la soldadura longitudinal del casco permitida por la norma es de tipo 3, junta a tope de un solo cordón sin tira de respaldo, $E=0,6$. Examinada mediante la prueba de líquidos penetrantes. En la figura 4.10 se muestra el tipo de soldadura escogida para el casco, y lo referente al espesor del mismo.

Al evaluar la ecuación 2.29, se determina que el espesor requerido de pared, debe ser:

$$t = \frac{110 \text{psi} \cdot 15,75 \text{pulg}}{12700 \text{psi} \cdot 0,6 - 0,6 \cdot 110 \text{psi}} = 0,23 \text{pulg} = 5,84 \text{mm}$$

Al espesor de lámina calculado se debe agregar el margen por corrosión, que por servicio para agua debe ser de $1/6$ del espesor calculado. Se selecciona la lámina de $1/4$ de pulgada, o 6,35mm

La determinación del espesor de pared de las tapas del tanque depende del tipo utilizado, así como del material, y de la eficiencia de la soldadura. Se escogieron cabezas elipsoidales de relación entre eje mayor y eje menor 2:1, del mismo material ASTM SA-283 grado C, y soldadura a tope de eficiencia E=0,6. Al evaluar la ecuación 2.24, se obtiene el valor del espesor de pared para las tapas del tanque:

$$t = \frac{110 \text{ psi} \cdot 31,5 \text{ pulg}}{2 \cdot 12700 \text{ psi} \cdot 0,6 - 0,2 \cdot 110 \text{ psi}} = 0,23 \text{ pulg} = 5,84 \text{ mm}$$

De igual manera el espesor de lámina comercial seleccionada es de ¼ de pulgada o 6,35mm. Incluyendo el margen por corrosión.

La pestaña o parte de porción recta, se utiliza para hacer la soldadura entre el casco y las cabezas; según la norma UW-13 [10,15] no es necesario el uso de la pestaña si el espesor de las cabezas es igual o menor al espesor del cilindro.

Según la norma UW-15 y UW-16, [10,15] las aberturas que se hagan al tanque con la finalidad de colocar boquillas, conexiones roscadas, o cualquier otro fin, no necesitan refuerzo en caso de que el diámetro del agujero no supere las 2 pulgadas. Por lo tanto no se requiere refuerzo en ninguna de las aberturas del tanque; en la figura 4.10 se muestran las boquillas y conexiones necesarias para el tanque diseñado.

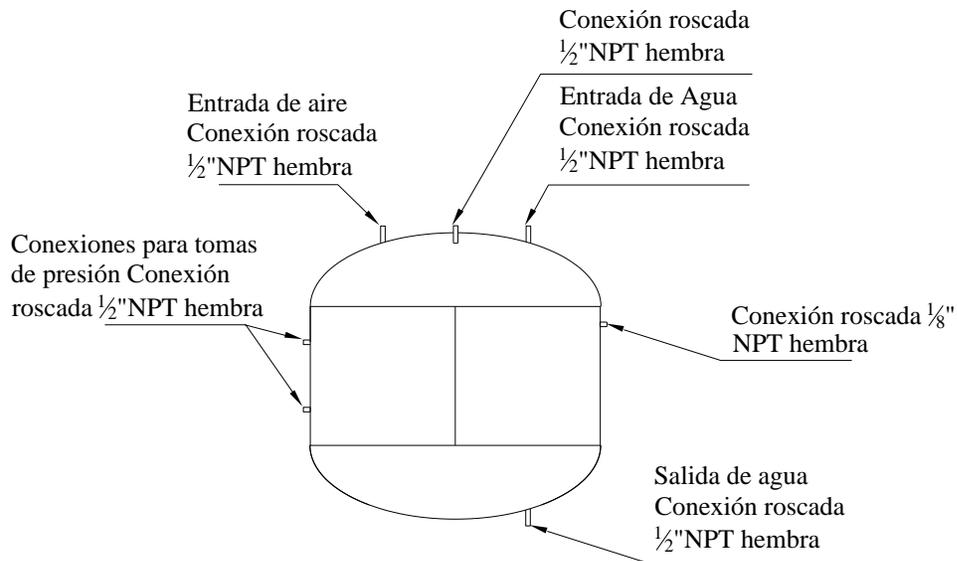


Figura 4.10 Boquillas y conexiones necesarias en el tanque.

Para calcular el espesor del faldón o soporte del tanque debe primero conocerse el peso total del tanque, incluyendo el fluido que se encuentra almacenado dentro del mismo.

El peso de las tapas o cabezas, y del casco cilíndrico, se calculan con el peso específico del acero que es $\gamma_{\text{acero}} = 0,2833 \text{ lb/in}^3 = 76,9\text{kN/m}^3$, y los volúmenes de acero utilizados. Estos cálculos se encuentran tabulados en el libro de Eugene Megyesy [10] tal como se muestra en la tabla 4.7 donde el peso del casco está dado en libras por pie lineal de casco. El peso del tanque vacío se calcula entonces mediante la ecuación 4.2.

$$W_{\text{tanque}} = 2 \cdot W_{\text{Cabeza}} + L_{\text{Casco}} \cdot W_{\text{casco}} \quad (4.2)$$

El espesor de las láminas seleccionadas es de 1/4pulg o 6,35mm. Y el diámetro interno del tanque de 31,5pulg o 800mm se puede aproximar a 32pulg.

Tabla 4.7 Peso de cascos y cabezas (lbf). [10]

Diámetro del recipiente (pulg)	Espesor de pared ¼pulg	
	Casco	Cabeza Elíptica
32	86	100

Al evaluar la ecuación 4.2 con el peso individual de una cabeza que es 80lb, y el peso del casco, que mide 388m equivalente a 1,27pie se obtiene el peso aproximado del tanque vacío.

$$W_{\text{tanque}} = 2 \cdot 80\text{lbf} + 1,27 \text{ pie} \cdot 100 \frac{\text{lbf}}{\text{pie}} = 160\text{lbf} + 127\text{lbf} = 287\text{lbf} = 1.276,63\text{N}$$

El peso del líquido se calcula con el volumen total contenido por el tanque, y el peso específico a 25° C del agua, que se encuentra en la tabla 4.5. El volumen contenido por una cabeza elipsoidal y el nivel de fluido en el casco esférico, se calcula mediante la ecuación 4.3.

$$V_{\text{tanque}} = \pi \cdot Di^2 \cdot \left(\frac{s}{6} + \frac{H}{4} \right) \quad (4.3)$$

Donde Di es el diámetro interno del recipiente, s es la longitud del semieje menor de la elipse que conforma el elipsoide, H es la altura de fluido en el casco cilíndrico. Evaluando la ecuación 4.3 se obtiene el volumen de agua contenido en el recipiente.

$$V_{\text{tanque}} = \pi \cdot 0,800\text{m}^2 \cdot \left(\frac{0,200\text{m}}{6} + \frac{0,288}{4} \right) = 0,212\text{m}^3 = 7,48\text{pie}^3$$

El peso del líquido contenido en el tanque se determina mediante la ecuación 4.4.

$$W_{\text{agua}} = \gamma_{30^{\circ}\text{C}} \cdot V_{\text{tanque}} \quad (4.4)$$

$$W_{\text{agua}} = \gamma_{30^{\circ}\text{C}} \cdot V_{\text{tanque}} = 9,780 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,212 \text{ m}^3 = 2,07 \text{ kN}$$

El peso total del tanque es la suma de ambos pesos, lo que resulta 3,35kN.

Habiéndose determinado el peso del tanque se puede determinar el espesor del faldón mediante la ecuación 4.5.

$$t = \frac{W}{D \cdot \pi \cdot S \cdot E} \quad (4.5)$$

En donde W es el peso total del tanque incluido el fluido de trabajo, D es el diámetro externo del recipiente, S es la resistencia admisible a tracción del material del faldón y E es la eficiencia de la soldadura. Al evaluar la ecuación 4.5 para el mismo material del tanque y soldadura a tope, se obtiene:

$$t = \frac{287,46 \text{ lb}}{31,74 \text{ pulg} \cdot \pi \cdot 12700 \cdot 0,60} = 3,78 \cdot 10^{-4} \text{ pulg} = 9,06 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

Para la construcción del faldón se utilizará lámina de ¼ pulg de espesor o 6,35mm.

El recipiente debe anclarse a la estructura mediante pernos de anclaje, éstos deben instalarse en múltiplos de 4, a continuación se realiza el diseño de la base y los pernos de anclaje según el método aproximado, ya que las condiciones a las que se expone el recipiente no hacen necesario el uso de un método analítico profundo [9].

CAPÍTULO IV – DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA PLANTEADO

Se debe escoger el tamaño de los pernos, para realizar los cálculos resistivos del anillo de la base, y determinar sus dimensiones, I_2 e I_3 que se muestran en la figura 4.11. Estas dimensiones están dadas de acuerdo al diámetro de perno seleccionado de la tabla 4.8.

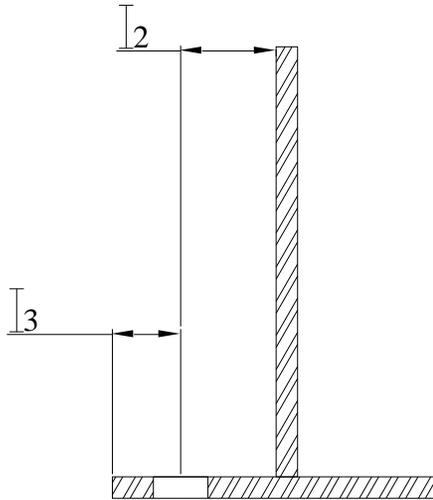


Figura 4.11 Dimensiones del anillo de la base. [10]

Tabla 4.8 Dimensiones del anillo de la base. [10]

Tamaño del perno	Área en la raíz del perno (pulg ²)	Dimensión (pulg)	
		I_2	I_3
1/2	0.126	7/8	5/8

La cantidad de pernos depende del diámetro del círculo base de pernos tal y como se muestra en la tabla 4.9.

Tabla 4.9 Número de pernos de anclaje. [10]

Número de pernos de anclaje		
Diámetro del círculo base de pernos (pulg)	Mínimo	Máximo
24 a 36	4	4

El esfuerzo máximo permitido para pernos utilizados como anclas se muestra en la tabla 4.10.

Tabla 4.10 Esfuerzo máximo permitido en pernos usados como anclas. [10]

Número de especificación	Diámetro (pulg)	Máximo esfuerzo permitido (psi-MPa)
SA 325	Todos los diámetros	15000-103,42

La cantidad y tamaño de pernos seleccionados se verifica mediante las ecuaciones de la tensión máxima (4.6), área requerida de un perno (4.7) y esfuerzo en el perno de ancla (4.8).

$$T = \frac{12 \cdot M}{A_B} - \frac{W}{C_b} \quad (4.6)$$

Donde M es el momento en la base debido a viento o sismo en pie*lb, A_B es el área dentro del círculo de pernos en pulg², W es el peso del recipiente durante la instalación (vacío) en lbf y C_B es la longitud de circunferencia del círculo de pernos en pulgadas.

$$B_A = \frac{T \cdot C_B}{S_B \cdot N} \quad (4.7)$$

Donde S_B es el esfuerzo máximo permitido en pernos usados como ancla (tabla 4.10) y N es el número de pernos de anclaje (tabla 4.9).

$$S'_B = \frac{T \cdot C_B}{B_A \cdot N} \quad (4.8)$$

Se tiene un círculo de pernos de 24 pulgadas de diámetro. Al evaluar las ecuaciones 4.7, 4.8 y 4.9 se obtiene:

$$T = \frac{12 \cdot 0}{226,98} - \frac{287,46 \text{ lbf}}{75,40 \text{ pulg}} = 3,81 \text{ lbf/pulg} = 667,23 \text{ N/m}$$

$$B_A = \frac{3,81 \text{ lbf/pulg} \cdot 75,40 \text{ in}}{15000 \text{ lbf/pulg}^2 \cdot 4} = 1,916 \cdot 10^{-2} \text{ pulg}^2 = 1,23 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

De la tabla 4.8 el área de la raíz de un perno de 1/2 pulg es de 0,126 pulg² o 8,1 · 10⁻⁵ m² mayor al área requerida de perno B_A .

$$S'_B = \frac{3,81 \text{ lbf/pulg} \cdot 75,40 \text{ pulg}}{0,126 \cdot 4} = 569,98 \text{ psi} = 3,93 \text{ MPa}$$

Se comprueba que el esfuerzo $S'_B < S_B$ por lo tanto la cantidad y tamaño de los pernos es satisfactorio.

4.6.2. Diseño del tanque 2.

El tanque 2 se utilizará para contener agua a la que se le aplicará calor, de manera de aumentar su temperatura hasta un valor dado, y existirá un sistema de control que se encargará de ajustar el valor correspondiente de temperatura.

El material seleccionado para la construcción de este tanque es el acrílico, debido a que puede ser utilizado en aplicaciones donde la temperatura no sobrepasa los 110°C; además el acrílico posee excelentes características de aislamiento térmico, y aislamiento eléctrico; es un material transparente que para esta aplicación didáctica resulta conveniente, en comparación con el vidrio, ya que pesa sólo la mitad y su resistencia a la ruptura es 7 veces mayor. Por otra parte entre los materiales plásticos posee el mejor comportamiento mecánico siendo el que tiene mayor resistencia a la flexión, a la compresión y a la tracción.

Para el diseño del tanque se establecen las especificaciones mostradas en la tabla 4.11.

Tabla 4.11 Especificaciones de diseño del tanque 2.

Parámetro	Valor del parámetro
Temperatura de trabajo	50- 60 °C
Dimensiones de la base	0,7m x 0,7m
Altura	0,8m
Volumen total del tanque	0,392m ³

De acuerdo a la ecuación 2.31 se calcula el espesor de pared “t” de las paredes del tanque.

CAPÍTULO IV – DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA PLANTEADO

La resistencia a la tracción del acrílico es 11.000psi o 75,84MPa de acuerdo a la tabla de propiedades físicas del acrílico de los fabricantes Altuglas Internacional.

Al evaluar la ecuación 2.31 con las especificaciones del tanque, la gravedad específica del agua (tabla 4.5) y el valor de α de la figura 2.11 se obtiene.

$$t_L = 2,45 \cdot (27,55 \text{ pulg}) \cdot \sqrt{\frac{0,022 \cdot (31,5 \text{ pulg}) \cdot 0,036 \cdot (0,985)}{10.000 \text{ psi}}} = 0,1 \text{ pulg} = 2,54 \text{ mm}$$

Para determinar el espesor de la placa de fondo se deben conocer los puntos de apoyo del tanque y la distancia entre los mismos, para lo cual se tomó la elección de colocar un apoyo en cada extremo y uno central tal como se muestra en la figura 4.12.

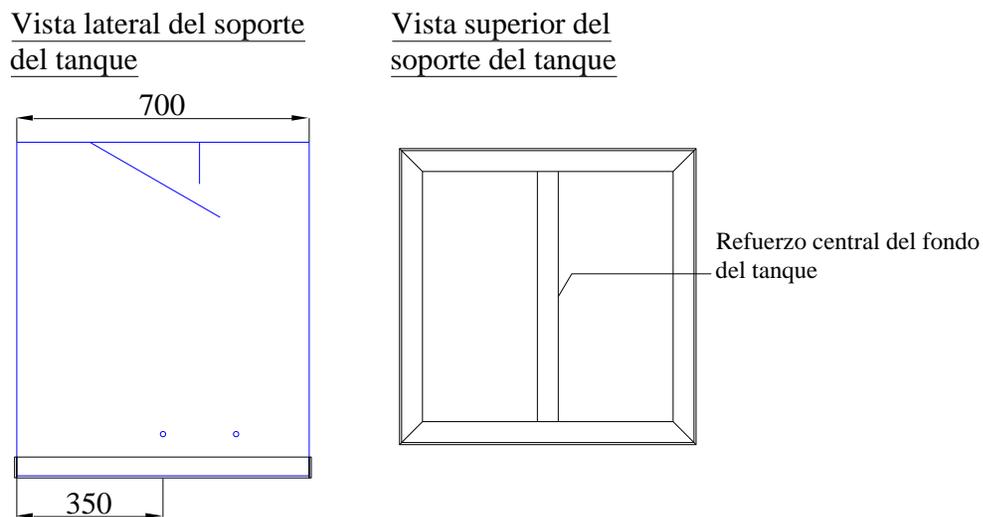


Figura 4.12 Estructura de la base del tanque 2 (dimensiones en mm).

Luego al evaluar la ecuación 2.32 se determina el espesor de la placa del fondo.

$$t_f = \frac{14 \text{ pulg}}{1,254 \cdot \sqrt{\frac{10000 \text{ psi}}{0,036 \cdot 0,985 \cdot 31,5 \text{ pulg}}}}} = 0,11 \text{ pulg} = 2,9 \text{ mm}$$

Se decidió utilizar el espesor de lámina de 5mm tanto para las placas laterales, como la placa de fondo, como factor de seguridad.

Adicionalmente se deben incorporar al tanque una placa acondicionadora de flujo como se muestra en la figura 4.13; estas láminas hacen que la entrada del fluido al tanque sea menos perturbadora, desviándolo, y disminuyendo su energía cinética. Evitando de esta manera fluctuaciones en los sistemas de medición, y posibles golpes a estos elementos tan delicados. Cabe destacar que esta placa será construida con el mismo material del tanque.

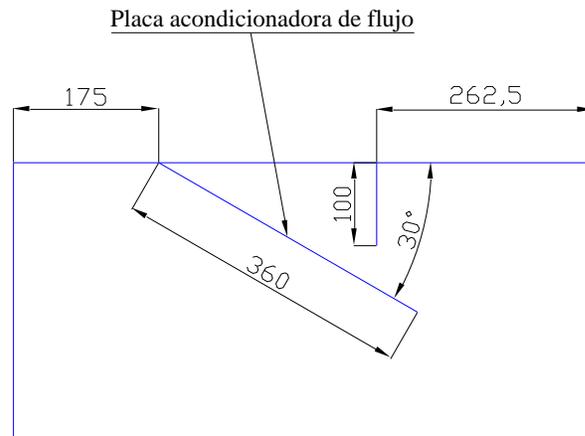


Figura 4.13 Detalle de la entrada de fluido al tanque, placa acondicionadora (dimensiones en mm).

Adicionalmente se debe procurar que la temperatura en el fluido dentro del tanque sea uniforme, para lo cual se debe introducir movimiento al fluido de manera de acelerar el proceso de convección natural a convección forzada al variar el gradiente de velocidades, y variar la concentración de la masa. Este elemento mecánico será

una pequeña bomba que recircule el agua, produzca el mismo principio físico de un agitador de aspas accionado por un motor eléctrico.

Para la construcción del tanque se utilizarán dos láminas de acrílico de 5mm de espesor y dimensiones 1,22 x 2,44 m. Las láminas se cortarán de la manera mostrada en la figura 4.14, ya que se produce menos material sobrante (rayado en color verde). Parte de este material será utilizado para hacer accesorios para el tanque, como las placas de acondicionamiento de flujo.

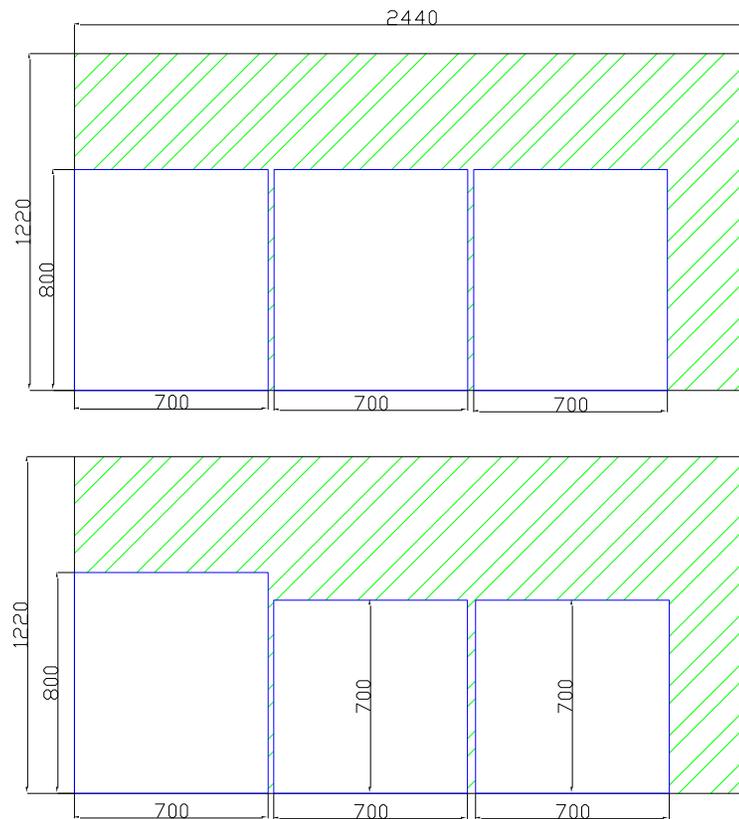


Figura 4.14 Corte de las láminas de acrílico para fabricar el tanque 1(dimensiones en mm).

4.6.3. Diseño del tanque 3.

El tanque 3 se utilizará para almacenar agua y se controlará el nivel de fluido contenido en el tanque, y se establecieron las especificaciones mostradas en la tabla 4.12. El material con el que se fabricará el tanque es acrílico.

Tabla 4.12 Especificaciones de diseño del tanque 3.

Parámetro	Valor del parámetro
Temperatura de trabajo	30 °C
Dimensiones de la base	1,5 x 1,0 m
Altura	0.8m
Volumen total del tanque	1,2m ³

Se utilizó el mismo método cálculo para los espesores de paredes laterales y de fondo del tanque 2 para el tanque 3.

Al evaluar la ecuación 2.31 se obtiene:

$$t_L = 2,45 \cdot (59,05 \text{ pulg}) \cdot \sqrt{\frac{0,022 \cdot (31,5 \text{ pulg}) \cdot 0,036 \cdot (0,998)}{10.000 \text{ psi}}} = 0,11 \text{ pulg} = 2,93 \text{ mm}$$

De igual manera se decidió colocar el tanque 3 sobre dos apoyos laterales y dos apoyos centrales tal y como se muestra en la figura 4.16.

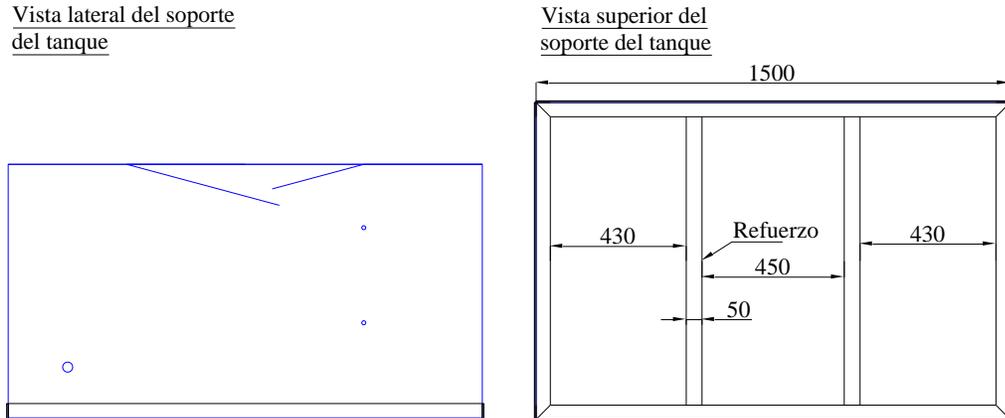


Figura 4.15 Estructura de la base del tanque 3 (dimensiones en mm).

Y al evaluar la ecuación 2.32 se obtiene:

$$t_f = \frac{19,68 pu \lg}{1,254 \cdot \sqrt{\frac{10000 psi}{0,036 \cdot 0,985 \cdot 31,5 in}}} = 0,16 in = 4,1 mm$$

Se decidió utilizar el espesor de lámina de 5mm para las placas laterales, y para la placa de fondo se utilizará una de espesor de 8mm, como factor de seguridad.

Adicionalmente se deben incorporar placas acondicionadoras de flujo a la entrada del tanque como se muestra en la figura 4.16, que serán construidas de acrílico.

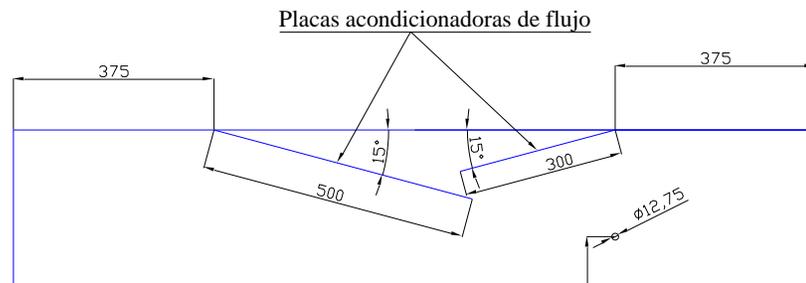


Figura 4.16 Detalle de la entrada del tanque, placas acondicionadoras de flujo (dimensiones en mm).

También deben colocarse rompedores de vórtice a la salida del tanque, los cuales estarán contruidos de acrílico como se observa en la figura 4.17. Este accesorio evita que se formen remolinos que pueden ser perjudiciales para la bomba debido a las burbujas producidas por las bajas presiones generadas. La longitud de la placa del rompe vértice debe ser de dos veces el diámetro de la abertura [9].

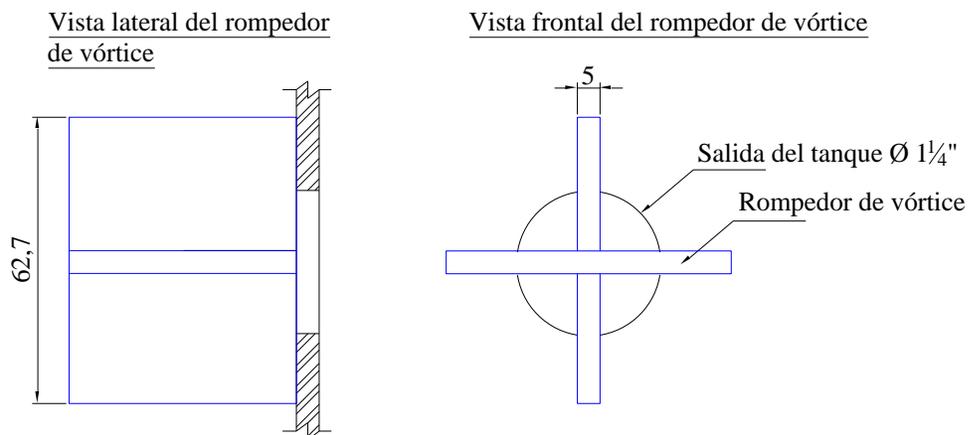


Figura 4.17 Detalle de los rompedores de vórtice (dimensiones en mm).

Para la construcción del tanque se utilizarán cinco láminas de acrílico de 5mm de espesor y dimensiones 1,22 x 1,83 m, y una de 8mm de espesor y las mismas dimensiones para el fondo del tanque. Las láminas se cortarán de la manera mostrada en la figura 4.18 ya que se produce menos material sobrante (rayado en color verde). Parte de este material será utilizado para hacer accesorios para el tanque, como las placas de acondicionamiento de flujo, y los rompedores de vórtice.

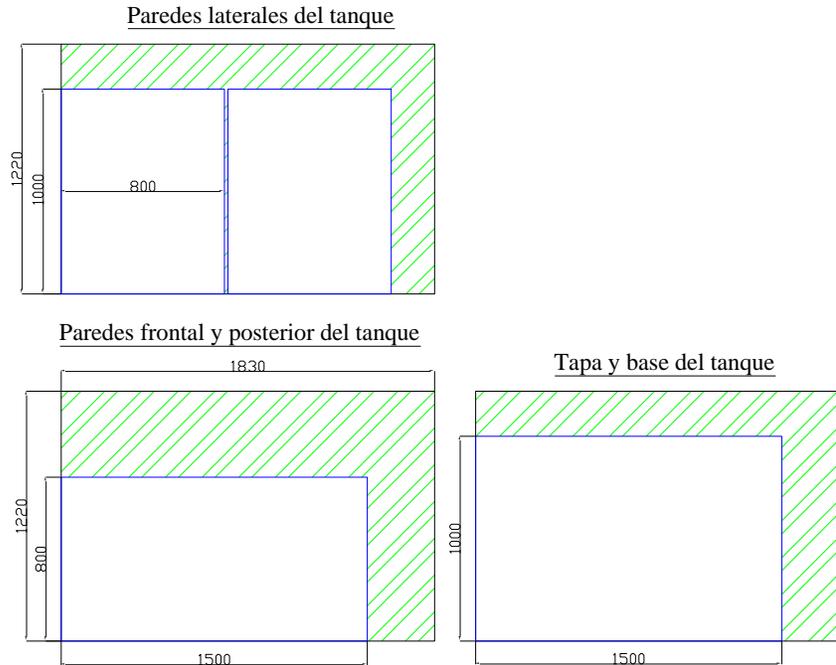


Figura 4.18 Corte de las láminas de acrílico para fabricar el tanque 3 (dimensiones en mm).

4.6.4. Diseño de la red de flujo y selección de la bomba.

La red de flujo está constituida por los tanques 1, 2 y 3, las tuberías, la bomba; y esta configurada como se muestra en la figura 4.19; donde se puede observar el recorrido de las tuberías, la colocación de la bomba, y otros accesorios como una placa orificio, y válvulas para controlar los flujos.

El esquema del sistema es el que se muestra en la figura 4.21, y se tomará como referencia para realizar los cálculos. El tramo de 1 a 4 es el tramo que va desde la “T” o punto 4 hasta el punto 1 que es el codo que va hacia la conexión de entrada de fluido al tanque 1. El tramo de 2 a 4 es el tramo que comprende desde el punto 4 hasta el punto 2 que es el codo que va hacia la conexión de entrada de fluido al tanque 2. El tramo D a 4 es el tramo desde la descarga de la bomba hasta el punto 4 y el tramo 3 a S es el tramo desde el tanque 3 hasta la succión de la bomba.

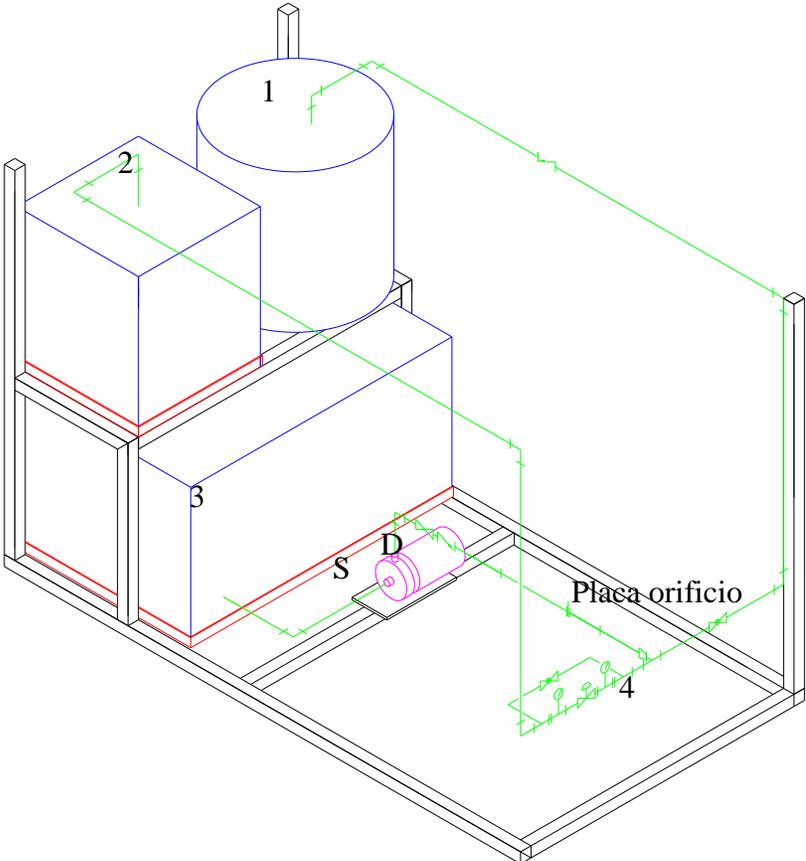


Figura 4.19 Configuración de la red de flujo.

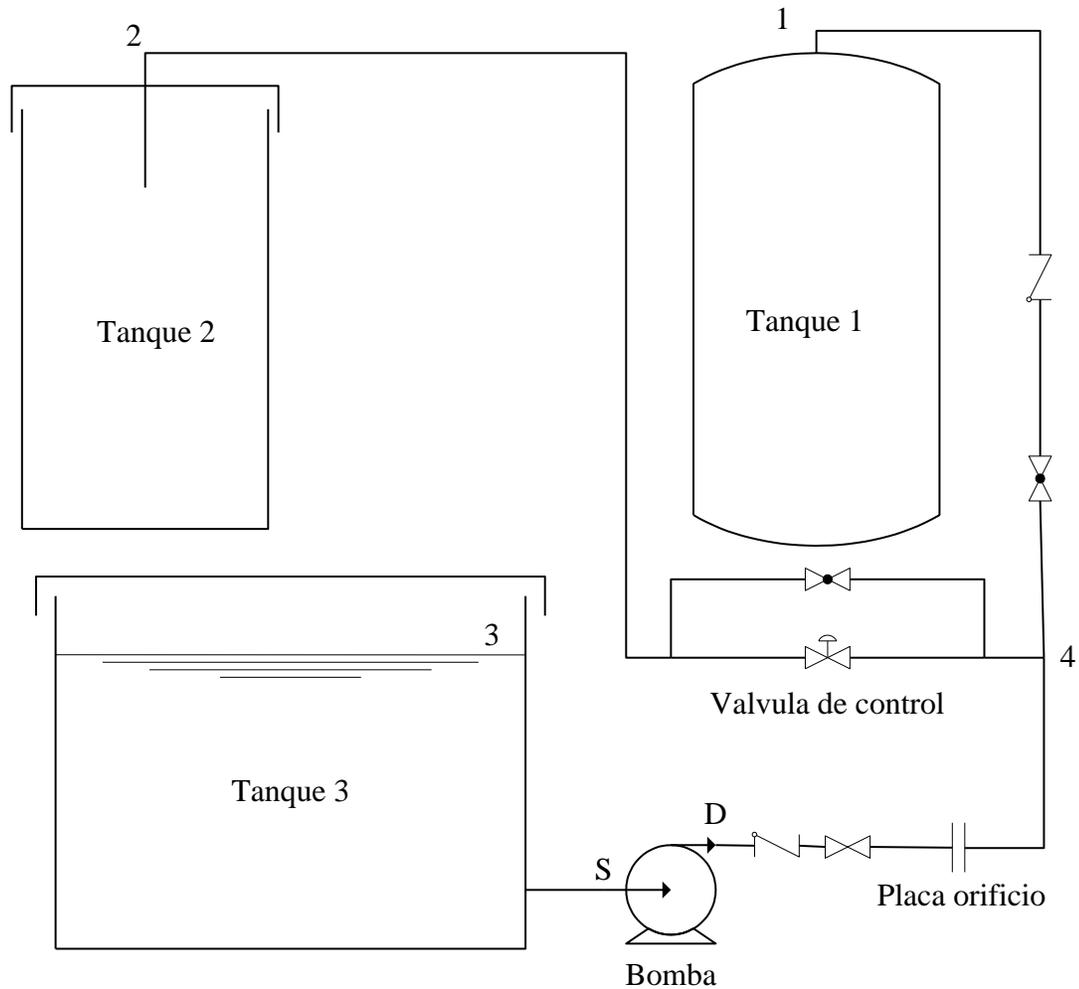


Figura 4.20 Esquema de la red de flujo.

Las disponibilidades de los tanques se calculan de acuerdo a la ecuación 2-6, donde γ se toma de la tabla 4.5. Y “Z” es la cota desde el datum de la bomba hasta el punto más alto del recorrido del fluido. Esta y otras dimensiones del sistema de flujo pueden observarse en la figura 4.22.

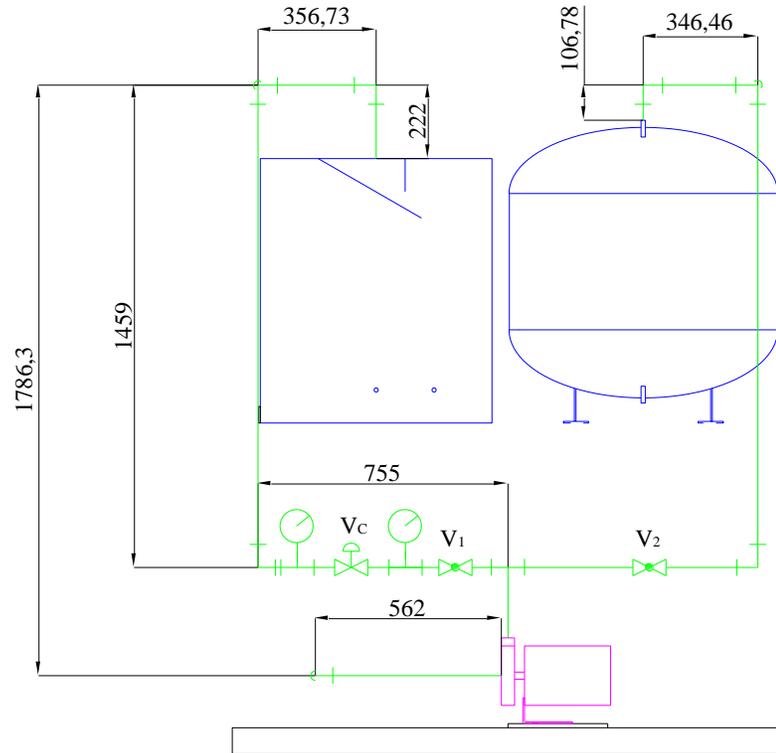


Figura 4.21 Tramos y dimensiones de la red de tuberías (mm), vista frontal.

$$H_1 = \frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1}{2g} = \frac{80 \text{ psig}}{62,14 \frac{\text{lb}_f}{\text{pie}^3}} * 144 \frac{\text{pul}^2}{\text{pie}^3} + 5,84 \text{ pie} + 0 = 191,23 \text{ pie.c.a} = 58,28 \text{ m.c.a}$$

$$H_2 = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2}{2g} = 0 + 1,78 \text{ m} + 0 = 1,78 \text{ m.c.a}$$

$$H_3 = \frac{P_3}{\gamma} + z_3 + \frac{V_3}{2g} = 0 + 0,60 \text{ m} + 0 = 0,60 \text{ m.c.a}$$

Para dimensionar las tuberías debe conocerse el flujo en la tubería, de acuerdo a esto se determina la velocidad del mismo y se compara con un límite de velocidades recomendadas. Para el caso del agua la velocidad recomendada es de 3pies/s a 10pies/s o de 0,9m/s a 3m/s.

Se tiene que el diámetro interno de la tubería de 1/2pulg es de 16,62mm, resultando un área de $2,17 \times 10^{-4} \text{m}^2$. Y la relación entre el caudal y la velocidad del fluido viene dada por la ecuación 4.9.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (4.9)$$

Al evaluar la ecuación 4.9 con los valores de caudal de una bomba comercial y el área de la tubería se obtienen los valores de velocidad del flujo en la tubería, y se presentan en la tabla 4.13.

Tabla 4.13 Velocidad de flujo en una tubería de 1/2 pulgada.

Caudal en m³/s	6x10⁻⁵	0.0001	0.0002	0.0002	0.0003	0.0004	0.0004	0.0005
Velocidad m/s	0.2765	0.553	0.8295	1.106	1.3825	1.659	1.9355	2.212

Comparando estos valores con los recomendados, se puede observar que la tubería de ½ pulgada es la adecuada para este uso; ya que se sabe que al aumentar el tamaño de tubería la velocidad del flujo disminuye. Se selecciona éste diámetro de tubería para los tramos comprendidos entre los puntos 4.1 y 4.2.

Para el tramo de descarga de la bomba desde D a 4 se selecciona tubería de 1 pulgada de diámetro, y para el tramo de succión de 3 a S tubería de 1 ¼ pulgadas, ya que estos son los diámetros requeridos por la descarga y la succión de la bomba.

Las longitudes de los tramos de tubería para el cálculo de las pérdidas por fricción se obtienen sumando las dimensiones mostradas en las figuras 4.24 y 4.25 y. Y el resultado de se presenta en la tabla 4.14.

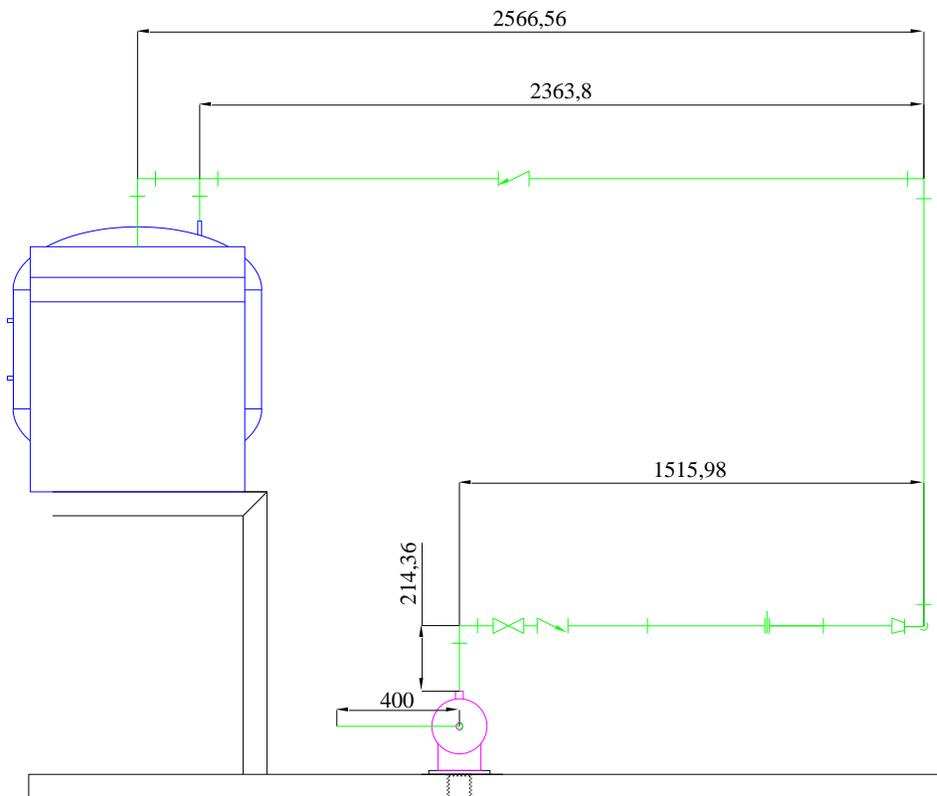


Figura 4.22 Dimensiones de la red de tuberías (mm), vista lateral.

Tabla 4.14 Características de los tramos de tubería.

Nº	Tramo	Longitud (m)	Diámetro nominal	
			pulg	mm
1	1-4	5,03	½	12,70
2	2-4	5,36	½	12,70
3	D-4	1,73	1	25,40
4	3-S	0,96	1 ¼	31,75

Las válvulas y accesorios necesarios en la red de flujo, se pueden observar en las figuras 4.21 y 4.22, y además se muestran detalladamente en la tabla 4.15.

Tabla 4.15 Cantidad de válvulas y accesorios necesarios en la red de flujo, por tramo.

Accesorio	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo4
Codo de 90°	4	4	1	1
Tee	4	0	1	0
Reducción de diámetro	0	0	1	0
Válvula antiretorno	0	1	1	0
Válvula de globo	2	1	0	0
Válvula de compuerta	0	0	1	0

Los tramos 1-4 y 2-4 trabajarán de manera individual, cerrando la válvula V_1 o V_2 dependiendo de la necesidad, debido a la gran diferencia de disponibilidad que existe entre ambos tanques y se usará un variador de frecuencia para llevar la bomba hasta un punto de trabajo adecuado para cada tanque. La válvula V_c es una válvula de control de tipo globo; posteriormente se establecerán más detalles técnicos acerca de la misma. Las válvulas V_1 , V_2 y V_c se muestran en la figura 4.21.

El método utilizado para la solución de la red de flujo es el método gráfico, debido a su facilidad de aplicación. Las ecuaciones que se utilizarán para los cálculos son 2.16, 4.10, 4.11 y 4.12, aplicadas a esta red de flujo.

$$H_{4-1} = H_1 + h_{total4-1} \quad (4.10)$$

$$H_{4-2} = H_2 + h_{total4-2} \quad (4.11)$$

$$H_{3-4} = H_3 + H_m - h_{total3-4} \quad (4.12)$$

CAPÍTULO IV – DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA PLANTEADO

El punto de operación de la bomba para cada caso, será la intersección de las curvas de comportamiento obtenidas de las ecuaciones 4.10 y 4.11 con la curva obtenida de la ecuación 4.12.

Las pérdidas por fricción por cada 100m de tubería de PVC tomadas del catálogo de TUBRICA se muestran en la tabla 4.16, y las pérdidas por cada 100m de tubería de acero tomadas del manual del instituto de hidráulica en la tabla 4.17

Tabla 4.16 Pérdidas por cada 100m de tubería de PVC (mca).

Caudal (l/min)	3	6	9	12	15	18	21	24
Pérdidas en mca tubería 1/2"	0.25	0.91	1.92	3.27	4.94	6.93	9.22	11.81

Tabla 4.17 Pérdidas por cada 100m de tubería de acero.[6]

Caudal (l/min)	3	6	9	12	15	18	21	24
Pérdidas en mca tubería 1"	0.0181	0.0817	0.161	0.255	0.345	0.528	0.712	0.908

Las pérdidas por fricción ocasionadas por los accesorios de PVC tomadas del catálogo de PAVCO se muestran en la tabla 4.18. Estas pérdidas son constantes e independientes del caudal.

Tabla 4.18 Pérdidas por fricción en accesorios de PVC (mca).

Accesorio	Diámetro nominal ½ pulg	Diámetro nominal 1 pulg
Codo 90°	0,5	0,8
Tee normal	0,9	1,5
Reduccion brusca d/D=1/2	0,2	0,4

Las pérdidas por fricción producidas por las válvulas se calcularon según la ecuación 2.16, donde k fue tomado de la tabla 32(b) del manual del instituto de hidráulica [5], para válvulas de globo roscadas de diámetro nominal ½ in, y válvulas

de compuerta de diámetro nominal de 1 pulgada y antiretorno, roscadas de diámetro nominal de ½ y 1 pulgada. Los valores de k y las pérdidas por fricción producidos son los mostrados en la tabla 4.19. Las velocidades dentro de la tubería se calculan de acuerdo a la ecuación 4.12 y g se asume como la aceleración de la gravedad estándar. Esta ecuación debe evaluarse en unidades inglesas y todos los valores de la tabla se han obtenido de acuerdo al siguiente cálculo tipo:

$$h_{f\text{válvula}} = k \frac{V^2}{2 \cdot g} = 14 \frac{0.57 \text{ft}^2 / \text{s}^2}{64.36} = 0,13 \text{ftca} = 0,04 \text{mca}$$

Tabla 4.19 Pérdidas por fricción ocasionadas por las válvulas (mca).

Caudal (l/min)	3	6	9	12	15	18	21	24
Válvula de globo Diam. ½ pulg. K =14	0.04	0.15	0.34	0.61	0.95	1.37	1.87	2.45
Válvula de compuerta Diam. 1 pulg. K =0,24	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04
Válvula antiretorno Diam. ½ pulg. K =5	0.01	0.05	0.12	0.22	0.34	0.49	0.67	0.88
Válvula antiretorno Diam. 1 pulg. K =3	0.01	0.03	0.07	0.13	0.21	0.30	0.40	0.53

Para la placa orificio se ha seleccionado una relación entre diámetro de orificio y diámetro de tubería $\beta = 0,5$. Sabiendo que la tubería tiene un diámetro nominal de una pulgada, se puede determinar el diámetro del orificio.

$$d_o = D_{tub} \cdot \beta = 1 \text{ pulg} \cdot 0,5 = 0,5 \text{ pulg} = 12,7 \text{mm}$$

En el libro de Antonio Creus [3], en la figura 4.5, se establecen las distancias mínimas; la posterior L_1 (aguas arriba), y la anterior L_2 (aguas abajo), donde se debe colocar la placa orificio sin que existan perturbaciones de flujo producidas por los accesorios que existen antes y después, tal como se muestra en la figura 4.23.

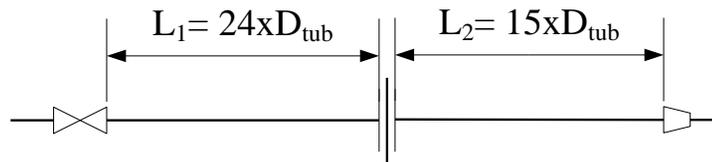


Figura 4.23 Distancias L_1 y L_2 mínimas para la colocación de la placa orificio.

Y se seleccionaron las tomas de presión en la brida, ya que son las recomendadas para tuberías de diámetro nominal menor a 2 pulgadas [12]. A continuación se desarrollan los cálculos para determinar las pérdidas por fricción producidas por la placa orificio.

Se procede a calcular el número de Reynolds respecto al diámetro de tubería según la ecuación 4.13.

$$Re_D = \frac{4}{\nu \cdot \pi \cdot D} \cdot Q \quad (4.13)$$

Donde Q es el caudal en m^3/s , ν es la viscosidad cinemática en m^2/s y D es el diámetro interno de la tubería en m .

Al evaluar la ecuación 4.13 con los valores respectivos de ν para el agua a 30°C es $8,03 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$, D es $0,026 \text{m}$, se obtienen los números de Reynolds para los distintos caudales, estos se muestran en la tabla 4.20.

Tabla 4.20 Número de Reynolds para el tramo 3

Caudal (m³/s)	0.00006	0.00012	0.00018	0.00024	0.0003	0.00036
Re_D	3570.55	7141.11	10711.66	14282.22	17852.77	21423.32

Tabla 4.20 Número de Reynolds para el tramo 3 (continuación).

Caudal (m³/s)	0.00042	0.00048
Re_D	24993.87	28564.43

Luego con el valor de β y el Reynolds se determina el coeficiente de descarga C_d de la placa orificio de acuerdo a la ecuación 4.14, los resultados se muestran en la tabla 4.21.

$$C_d = 0,5959 + 0,0312 \cdot \beta^{2.1} - 0,184 \cdot \beta^8 + 0,0029 \cdot \beta^{2.5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0,75} + \dots \quad (4.14)$$

$$\dots + \left(\frac{0,039}{D}\right) \cdot \frac{\beta^4}{1-\beta^4} \cdot \left(\frac{0,85598}{D}\right) \cdot \beta^3$$

Tabla 4.21 Coeficientes de descarga de la placa orificio.

Caudal (m³/s)	0.00006	0.00012	0.00018	0.00024	0.0003	0.00036
C_d	0.64	0.62	0.62	0.61	0.61	0.61

Tabla 4.21 Coeficientes de descarga de la placa orificio (continuación).

Caudal (m³/s)	0.00042	0.00048
C_D	0.61	0.61

Luego se define el coeficiente de flujo, que depende de β y de C_d , de acuerdo a la ecuación 4-18, y los resultados se muestran en la tabla 4.22.

$$C = \frac{C_d}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (4.15)$$

Tabla 4.22 Coeficiente de flujo C de la placa orificio.

Caudal (m³/s)	0.00006	0.00012	0.00018	0.00024	0.0003	0.00036
C	0.66	0.64	0.64	0.64	0.63	0.63

Tabla 4.22 Coeficiente de flujo C de la placa orificio (continuación).

Caudal (m³/s)	0.00042	0.00048
C	0.63	0.63

Se calcula el coeficiente de resistencia del orificio k_{orif} que depende de β y de C, según la ecuación 4.16, y los resultados se muestran en la tabla 4.23.

$$K_{orif} = \frac{1-\beta^2}{C^2} \quad (4.16)$$

Tabla 4.23 Coeficiente de resistencia del orificio k_{orif}

Caudal (m³/s)	0.00006	0.00012	0.00018	0.00024	0.0003	0.00036
k_{orif}	1.730	1.810	1.842	1.860	1.871	1.880

Tabla 4.23 Coeficiente de resistencia del orificio k_{orif} (continuación).

Caudal (m³/s)	0.00042	0.00048
k_{orif}	1.886	1.891

Y se calculan las pérdidas por fricción h_L producidas por la placa orificio según la ecuación 4-17. Los resultados del cálculo se muestran en la tabla 4.24.

$$h_L = k_{\text{orif}} \cdot \frac{V_b^2}{2 \cdot g} \quad (4.17)$$

Donde V_b es la velocidad del fluido luego del orificio, y g es la aceleración estándar de la gravedad $9,81\text{m/s}^2$.

Tabla 4.24 Velocidad luego del orificio y pérdidas por fricción causadas por la placa orificio.

Caudal (m³/s)	0.00006	0.00012	0.00018	0.00024	0.0003	0.00036
V_b (m/s)	0.474	0.947	1.421	1.895	2.368	2.842
h_L (mca)	0.020	0.083	0.190	0.340	0.535	0.774

*Tabla 4.24 Velocidad luego del orificio y pérdidas por fricción causadas por la placa orificio
(continuación).*

Caudal (m³/s)	0.00042	0.00048
V_b (m/s)	3.316	3.789
h_L (mca)	1.057	1.384

Se ha seleccionado una bomba centrífuga Mardal modelo MAX-75, con motor monofásico a 60 Hz, y 3500 rpm, de fabricación nacional y con el comportamiento mostrado en la tabla 4.25 y la figura 4.24. Debido a que la aplicación de este tipo de bomba es esencialmente doméstica, para operación de hidroneumáticos, riego de jardines y abastecimiento de agua en general; el fabricante no realiza ensayos de cavitación, eficiencia, ni potencia de accionamiento. Por lo tanto no se dispone de estos datos para realizar el estudio detallado del sistema de bombeo.

Tabla 4.25 Comportamiento de la bomba Disponibilidad vs. Caudal.

Caudal (L/min)	3	6	9	12	15	18	21	24
H_m (mca)	98.5	95.8	91.5	86.5	80,0	72,0	60,0	41,0

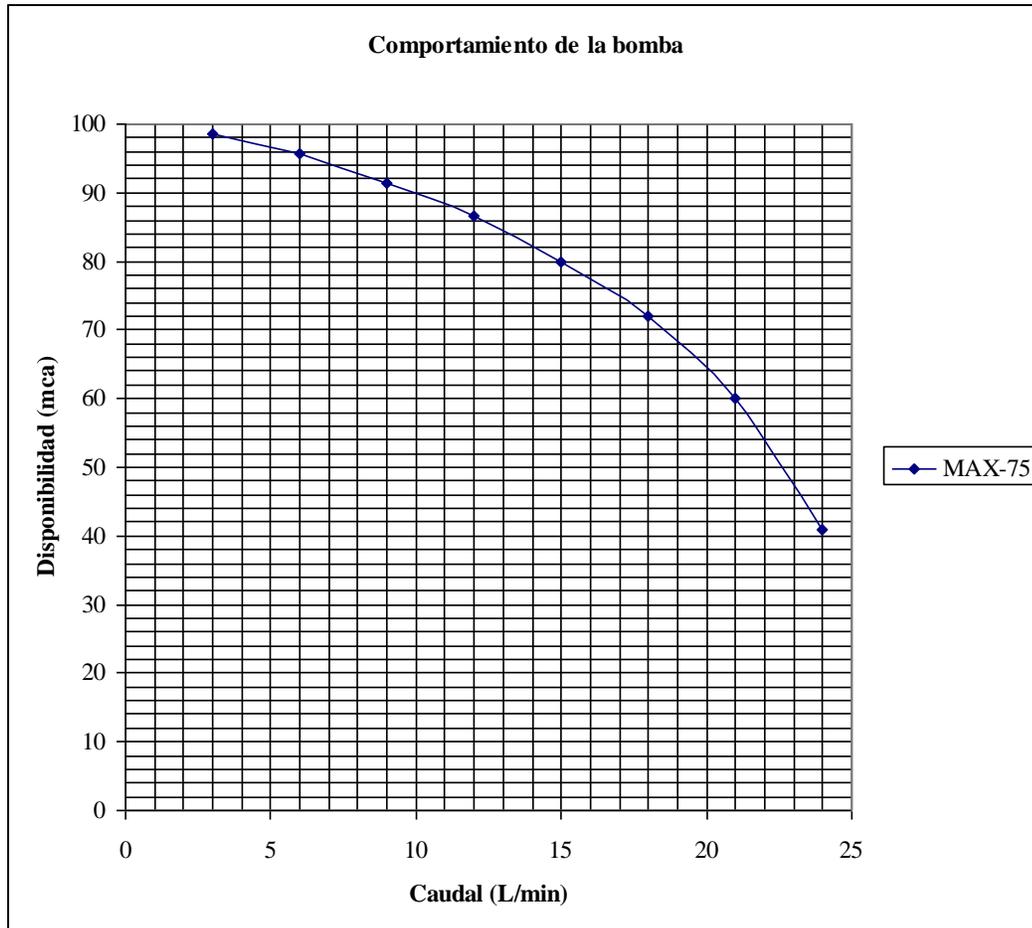


Figura 4.24 Curva del comportamiento de la bomba Disponibilidad vs. Caudal.

Habiendo determinado las pérdidas por fricción producidas por los accesorios y las tuberías, las disponibilidades de los tanques, y habiendo escogido una bomba que se adapte al sistema, queda evaluar las ecuaciones 4-10, 4-11 y 4-12 para determinar la solución gráfica del sistema, cuyos puntos se muestran en la tabla 4.26 y la figura 4.25 obtenidos según las ecuaciones 4-18 y 4-19, que son el desglose de las ecuaciones 4-11 y 4-12 respectivamente. Donde H_i es la disponibilidad el tanque, L es la longitud del tramo de tubería, $N^{\circ}_{\text{accesorios}}$ se toma de la tabla 4.15, $h_{f \text{ accesorio}}$ se toma de la tabla 4.18, $h_{f \text{ tubería}}$ se toma de la tabla 4.16 o 4.17 según sea la ecuación 4-

CAPÍTULO IV – DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA PLANTEADO

18 o 4-19 respectivamente, y por último $h_{f \text{ válvula}}$ se toma de la 4.19 según el tipo de válvula.

$$H_{4(4-1)} = H_1 + L \cdot h_{f \text{ tubería}} + N^{\circ} \text{ accesorios} \cdot h_{f \text{ accesorio}} + h_{f \text{ válvula.globo}} + h_{f \text{ válvula.check}} \quad (4.18)$$

$$H_{4(3-4)} = H_3 + H_m - \zeta \cdot h_{f \text{ tubería}} + N^{\circ} \text{ accesorios} \cdot h_{f \text{ accesorio}} + \dots + h_{f \text{ válvula.compuerta}} + h_{f \text{ válvula.check}} + h_{f \text{ placa.orificio}} \quad (4.19)$$

Tabla 4.26 Puntos para la curva de comportamiento del sistema cuando sólo trabajan los tanques 1 y 3.

Caudal (L/min)	3	6	9	12	15	18	21	24
$H_{4(4-1)}$ (mca)	60.34	60.53	60.84	61.28	61.83	62.50	63.29	64.20
$H_{4(3-4)}$	96.17	93.37	88.90	83.67	76.88	68.51	56.08	36.58

Se puede observar en la figura 4.28, que el punto de trabajo para el sistema con la válvula de globo totalmente abierta y cuando sólo trabajan los tanques 1 y 3, es el mostrado en la tabla 4.27.

Tabla 4.27 Punto de trabajo del sistema cuando sólo trabajan los tramos 3-4 y 4-1.

Punto de trabajo	
Caudal (L/min)	19,50
Disponibilidad (mca)	63,00

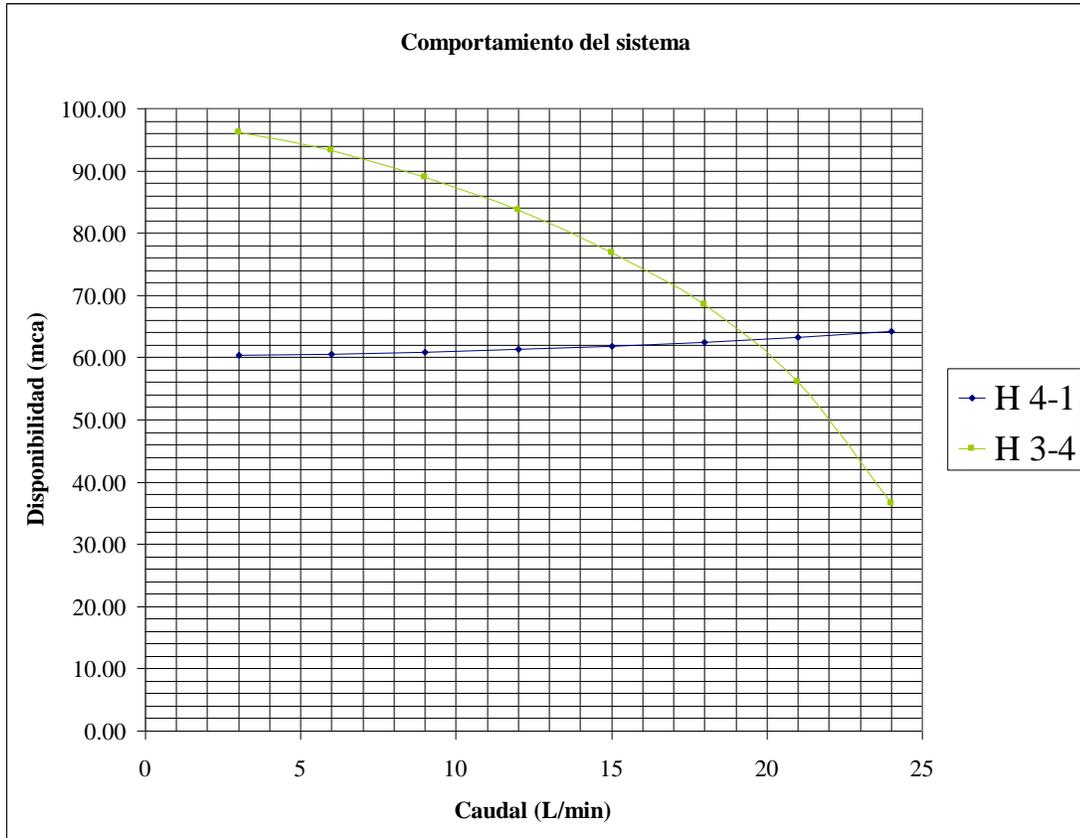


Figura 4.25 Comportamiento del sistema cuando sólo trabajan los tanques 1 y 3.

Cómo se dijo anteriormente, los tramos 1-4 y 2-4 trabajarán de manera individual, cerrando la válvula V_1 o V_2 dependiendo de la necesidad. Ahora habiéndose seleccionado la bomba, se realizará el estudio mediante las ecuaciones de similitud 4-20 y 4-21 para determinar el comportamiento de la bomba a una velocidad de giro menor. Esto se logrará con un variador de frecuencia, para que el motor de la bomba gire a 1750rpm.

$$\frac{H_t}{H_n} = \left(\frac{N_t}{N_n} \right)^2 \quad (4.20)$$

$$\frac{Q_t}{Q_n} = \frac{N_t}{N_n} \quad (4.21)$$

El subíndice t se refiere a disponibilidad (H_t) o caudal (Q_t) de trabajo, y el subíndice n, al valor de estas variables cuando la bomba gira a su velocidad nominal. Al sustituir los valores de las velocidades de giro $N_t = 1750\text{rpm}$ y $N_n = 3500\text{rpm}$. Se obtienen las ecuaciones 4-22 y 4-23, para determinar el nuevo comportamiento de la bomba mostrado en la tabla 4.28 y la figura 4.29.

$$H_t = H_n \cdot \left(\frac{1750}{3500}\right)^2 = H_n \cdot 0.25 \quad (4.22)$$

$$Q_t = Q_n \frac{1750}{3500} = Q_n \cdot 0.5 \quad (4.23)$$

Tabla 4.28 Comportamiento de la bomba con una velocidad de giro de 1750rpm.

Caudal (L/min)	1.50	3.00	4.50	6.00	7.50	9.00	10.50	12.00
H_m (mca)	24.63	23.95	22.88	21.63	20.00	18.00	15.00	10.25

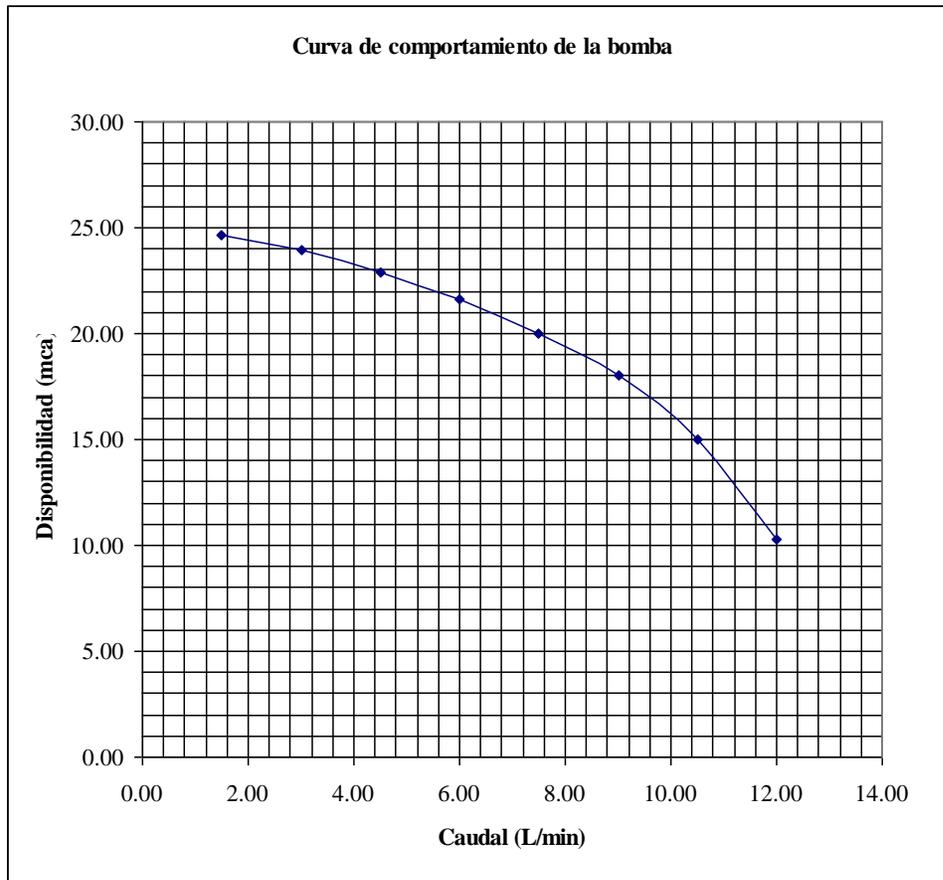


Figura 4.26 Comportamiento de la bomba a una velocidad de giro de 1750rpm.

Se realiza un cálculo análogo al anterior para determinar el punto de trabajo del sistema para estas condiciones. Utilizando las ecuaciones 4-19 y 4-24, se determinan los puntos del sistema que se muestran en la tabla 4.29 y en la figura 4.30.

$$H_{4(4-2)} = H_2 + L \cdot h_{f \text{ tubería}} + N^{\circ} \text{ accesorios} \cdot h_{f \text{ accesorio}} + 2 \cdot h_{f \text{ válvula.globo}} \quad (4.24)$$

Tabla 4.29 Comportamiento del sistema cuando sólo trabajan los tanques 2 y 3.

Caudal (L/min)	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12
$H_{4(4-1)}$ (mca)	7.28	7.36	7.50	7.69	7.93	8.24	8.59	9.01
$H_{4(3-4)}$	22.32	21.62	20.53	19.19	17.57	15.40	12.44	7.42

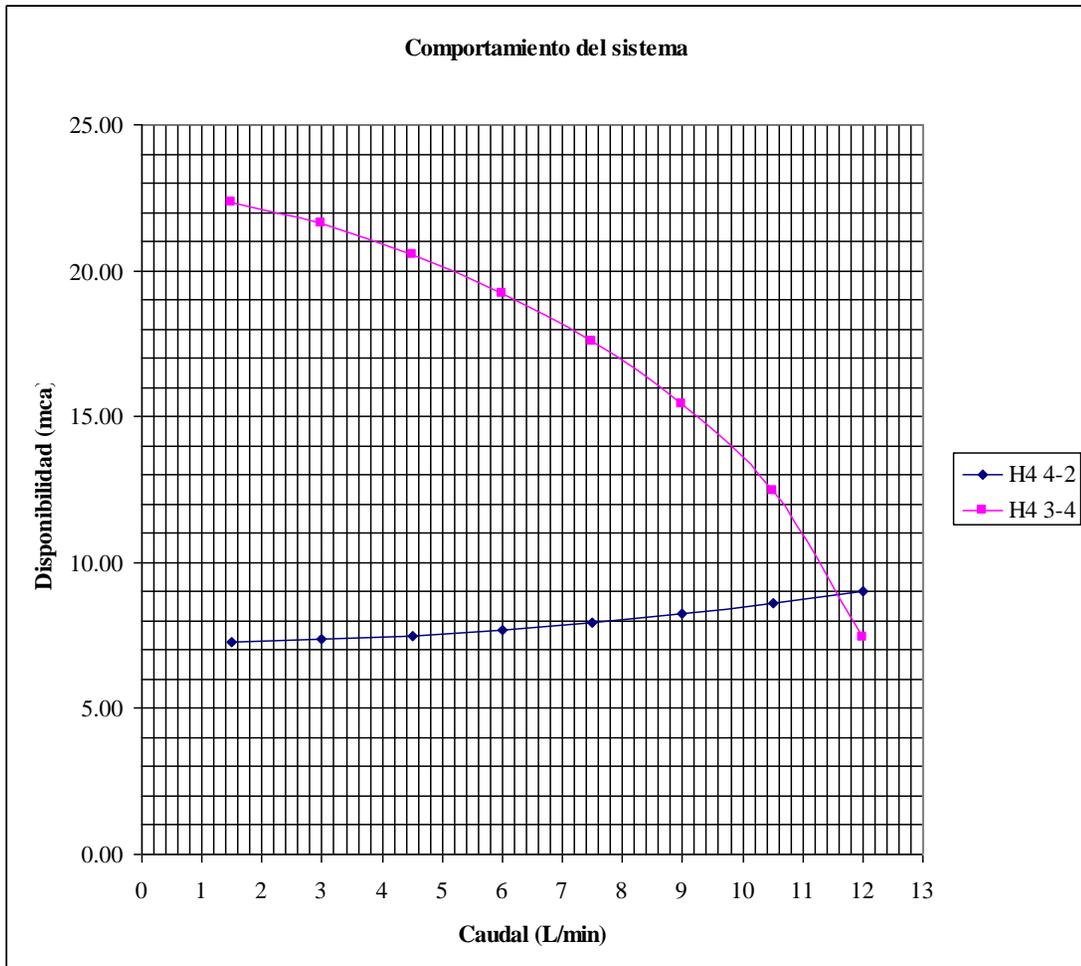


Figura 4.27 Comportamiento del sistema cuando sólo trabajan los tanques 2 y 3.

De la intersección de las curvas en la figura 4.30 se obtiene el punto de trabajo mostrado en la tabla 4.30 para el sistema con ambas válvulas de globo totalmente abiertas cuando sólo trabajan los tanques 2 y 3 y la bomba opera a 1750rpm.

Tabla 4.30 Punto de trabajo del sistema cuando sólo trabajan los tramos 3-4-1.

Punto de trabajo	
Caudal (L/min)	11,60
Disponibilidad (mca)	9,00

4.7. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA USANDO EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

El diseño estático de la estructura se llevó a cabo utilizando el método de los elementos finitos como herramienta para la determinación de los esfuerzos permisibles. Éste método, se aplicó a las partes de la estructura que sostienen los tanques que contienen agua, siendo estas las partes más esforzadas del diseño, ya que soportan las mayores cargas durante el funcionamiento del sistema, es decir, son las partes más críticas. En la figura 4.28 se observa la estructura que será estudiada mediante el análisis de esfuerzos.

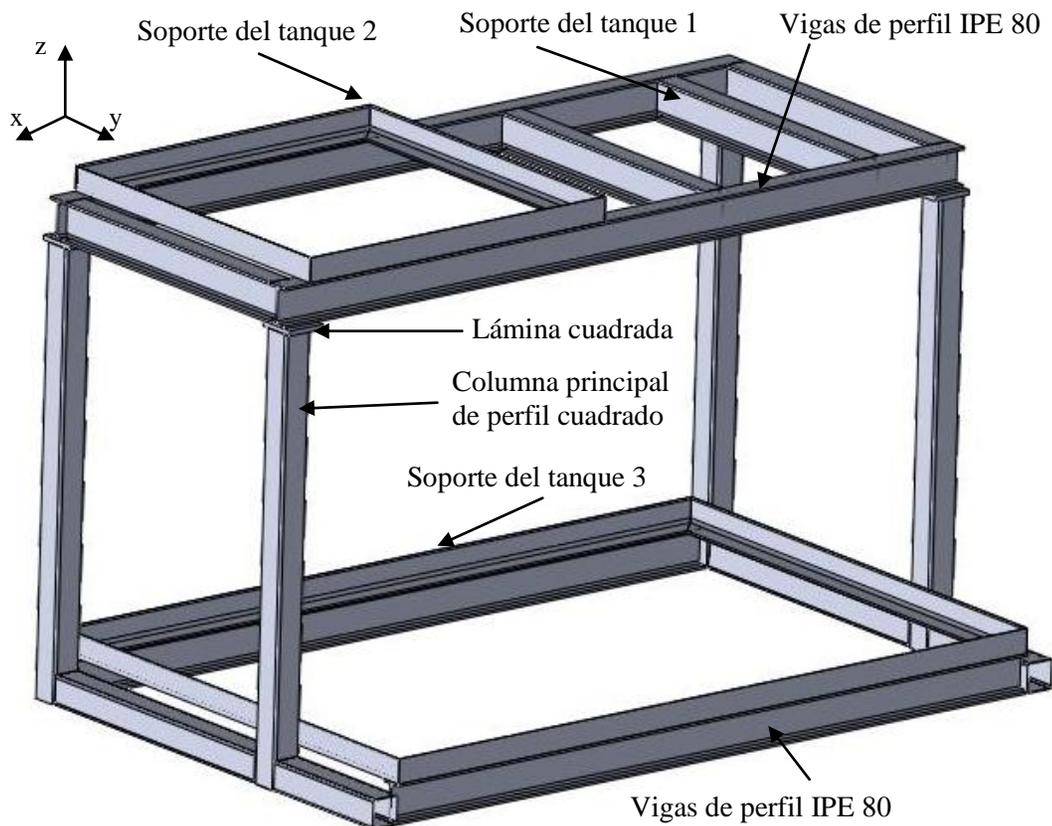


Figura 4.28 Partes críticas de la estructura estudiadas utilizando el método de elementos finitos.

4.7.1. Selección del factor de seguridad mínimo para el diseño.

Se seleccionó el factor de seguridad mínimo para el diseño de las partes de la estructura, esto con el fin de comprobar que las piezas diseñadas son capaces de soportar las cargas a las que son sometidas. Para hacer esta selección se siguieron las consideraciones presentadas en la tabla 4.31 que resume ciertos aspectos y proporciona orientación para determinar el factor de seguridad requerido, donde se hace énfasis en factores como la calidad y lo apropiado de los datos y propiedades de los materiales, así como en las condiciones de servicio a las que son sometidas las piezas, y también la precisión de los modelos de análisis de esfuerzos.

El paso que sigue es determinar el factor correspondiente a cada elemento de información presentado en la tabla 4.31, luego se selecciona el máximo valor entre los tres factores como se observa en la ecuación 4.25.

$$FS \cong \text{Max} (F1, F2, F3) \quad (4.25)$$

Tabla 4.31 Factores utilizados para determinar un factor de seguridad para materiales dúctiles[12].

Información	Calidad de la información	Factor
Datos del material disponibles de pruebas		F1
	El material realmente utilizado fue probado	1,3
	Datos representativos del material disponibles a partir de pruebas	2
	Datos suficientemente representativos del material disponibles a través de pruebas	3
	Datos poco representativos del material disponibles a través de pruebas	5+

Tabla 4.31 (Continuación) Factores utilizados para determinar un factor de seguridad para materiales dúctiles. [12]

Información	Calidad de la información	Factor
Condiciones del entorno en el cual se utilizará		F2
	Idénticas a las condiciones de prueba del material	1.3
	Esencialmente en un entorno ambiente de habitación	2
	Entorno moderadamente agresivo	3
	Entorno extremadamente agresivo	5+
Modelos analíticos para carga y esfuerzos		F3
	Los modelos han sido comprobados contra experimentos	1.3
	Los modelos representan al sistema con precisión	2
	Los modelos representan al sistema aproximadamente	3
	Los modelos son una burda aproximación	5+

Los datos acerca de los materiales utilizados para la determinación de la resistencia, fueron proporcionados por el software “COSMOS/DesignSTAR” basado en datos suministrados por la compañía “MatWeb” que reúne una extensa colección de pruebas de materiales suministrados por fabricantes y distribuidores [9]. Se consideran “datos representativos del material disponibles a partir de pruebas”.

En cuanto a las condiciones del entorno en el cual se utilizarán las piezas, según el ambiente por ser un laboratorio se considera “esencialmente en un entorno ambiente de habitación”.

Al hacer referencia a los modelos analíticos para carga y esfuerzos, se considera que el análisis por elementos finitos es un modelo bastante fiable [12], además que las cargas y restricciones aplicadas a las piezas del modelo representan de forma muy aproximada al sistema real, por ende se puede seleccionar la opción “los modelos representan al sistema con precisión”.

Al aplicar las consideraciones hechas en la ecuación se obtiene que el valor para el factor de seguridad mínimo sea igual a 2 tal como se observa en la ecuación 4.26.

$$FS \cong \text{Max}(2,2,2) = 2 \quad (4.26)$$

4.7.2. Características del modelo.

Se utilizaron datos de aceros obtenidos de referencias bibliográficas, y a su vez se hicieron ciertas suposiciones, como por ejemplo, la de la homogeneidad o isotropía del material, la inexistencia de fallas internas o grietas, y con una superficie lisa sin ranuras ni rayados. El material escogido para las piezas es el acero para uso estructural ASTM A-36, disponible en el mercado venezolano, y las propiedades mecánicas fueron proporcionadas por el software “COSMOS/DesignSTAR”.

La malla utilizada es de elementos sólidos tetraédricos parabólicos donde cada elemento tiene 10 nodos: 4 nodos angulares y un nodo en el medio de cada arista (un total de 6 nodos centrales). Este modelo permite obtener mayor precisión matemática en estudio de piezas que presentan contornos curvos (redondeos, agujeros, etc.). Cada uno de los elementos posee 3 grados de libertad permitiendo la representación y la aproximación cuadrática de las traslaciones en las 3 direcciones ortogonales “x”, “y” y “z”.

4.7.3. Análisis de convergencia.

Se utilizó como parámetro para determinar la convergencia el esfuerzo máximo de von Mises de la convergencia del esfuerzo de von Mises en relación al número de nodos. La variación del tamaño máximo de la arista del elemento se hace de manera

progresiva hasta que se determine una variación menor al 5% entre dos iteraciones subsiguientes, se considera confiable el resultado obtenido [16].

4.7.4. Diseño del soporte del tanque 1.

El soporte del tanque 1 está constituido por dos vigas IPE 80 de acero estructural ASTM A-36; tal como puede observarse en la figura 4.29 pintadas de color azul. El tanque está apoyado sobre estas dos vigas, distribuyendo su peso uniformemente, por lo que se dividió el peso del tanque en dos, y se procedió a hacer el estudio en sólo una de las dos vigas.

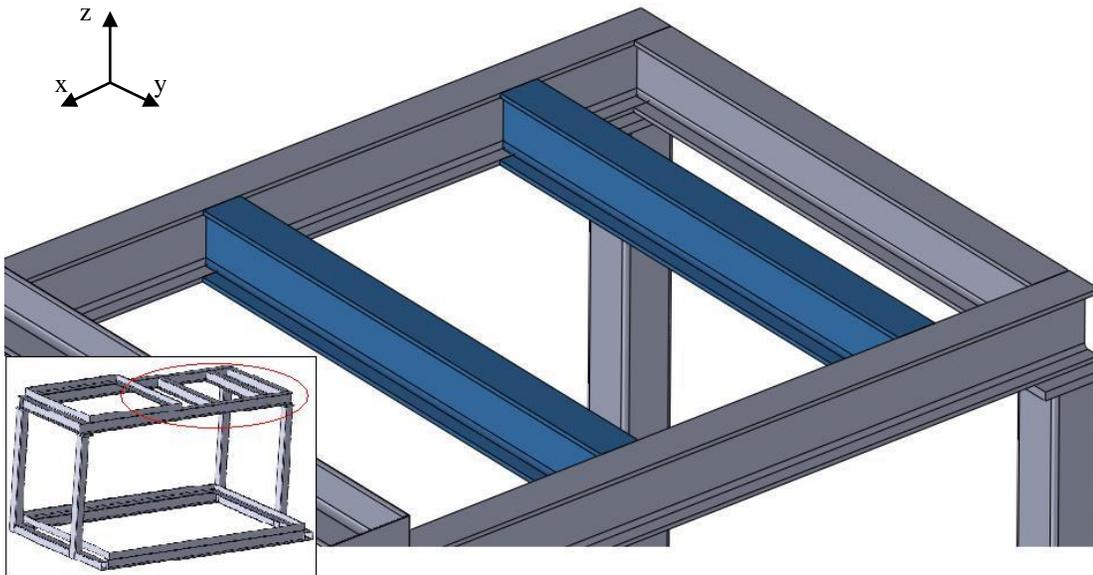


Figura 4.29 Soporte del tanque 1.

Se procedió entonces a aplicar la carga sobre la pieza, de manera normal, y en el sentido negativo de la dirección ortogonal “z”, y se restringieron los desplazamientos en las 3 direcciones ortogonales de las caras donde irá sujeta la pieza a la estructura general mediante soldadura. Esto puede ser observado en la figura 4.30.

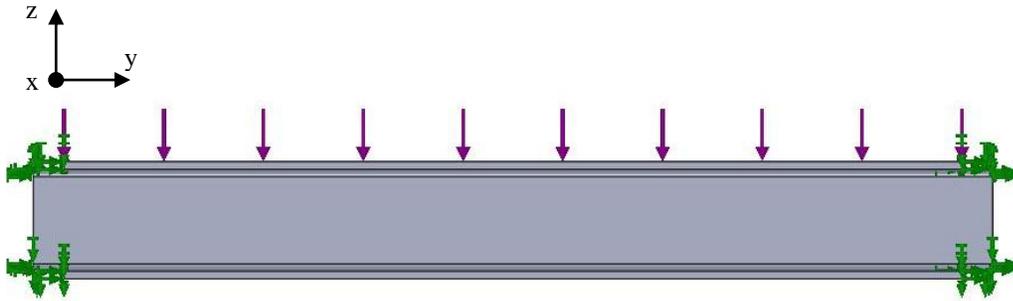


Figura 4.30 Fuerzas y restricciones aplicadas al soporte del tanque 1.

En la figura 4.31 se puede apreciar la representación gráfica de los puntos obtenidos en las diferentes iteraciones. Se puede observar que existe una tendencia hacia un valor, siendo éste $8,400 \times 10^6$ Pa, por lo que se puede considerar que existe convergencia. Se escogen los resultados arrojados en la iteración número 4, ya que el error con respecto a la iteración anterior es menor al 5%.

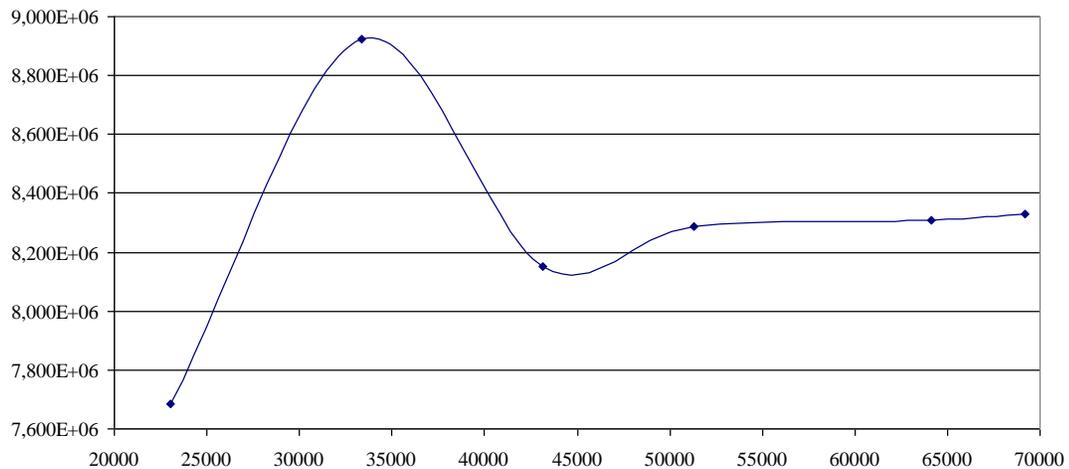


Figura 4.31 Curva de convergencia del esfuerzo máximo de von Mises con el número de nodos de la malla aplicada.

En la figura 4.32, correspondiente a la iteración número 4, se puede observar la distribución de las tensiones máximas de von Mises a lo largo de toda la pieza mientras es sometida al estado de esfuerzos. Se puede observar que existe un concentrador de esfuerzos en la arista correspondiente a la soldadura de esta pieza

con la estructura general. En estos puntos, la tensión de von Mises presenta un valor de $8,287 \times 10^6$ Pa que es menor a la máxima tensión admisible para electrodos 6013 equivalente a $4,137 \times 10^8$ Pa, lo que significa que la soldadura es capaz de resistir los esfuerzos producidos.

En la figura 4.33 que también corresponde a los resultados de la cuarta iteración, se puede observar la distribución del factor de seguridad a lo largo de la pieza, mostrándose el mínimo en el concentrador de tensiones que se ha descrito anteriormente. Éste factor de seguridad mínimo, tiene un valor de 30,17 siendo mucho mayor a 2. Por lo que se puede concluir a través de este estudio que la pieza es capaz de soportar los esfuerzos a los que estaría sometida durante el funcionamiento del sistema.

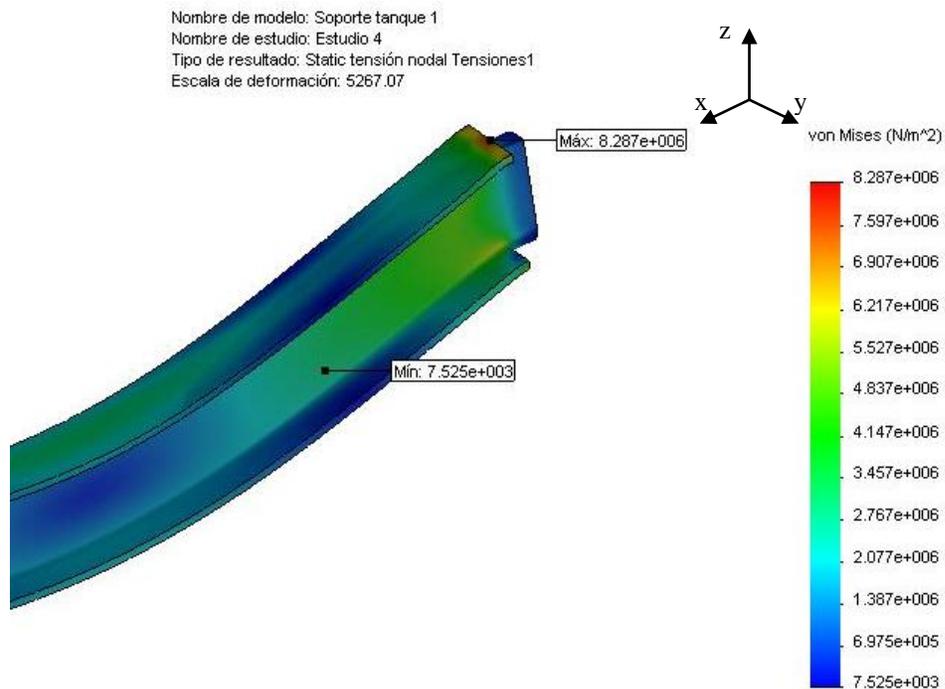


Figura 4.32 Distribución de las tensiones de von Mises en la pieza.

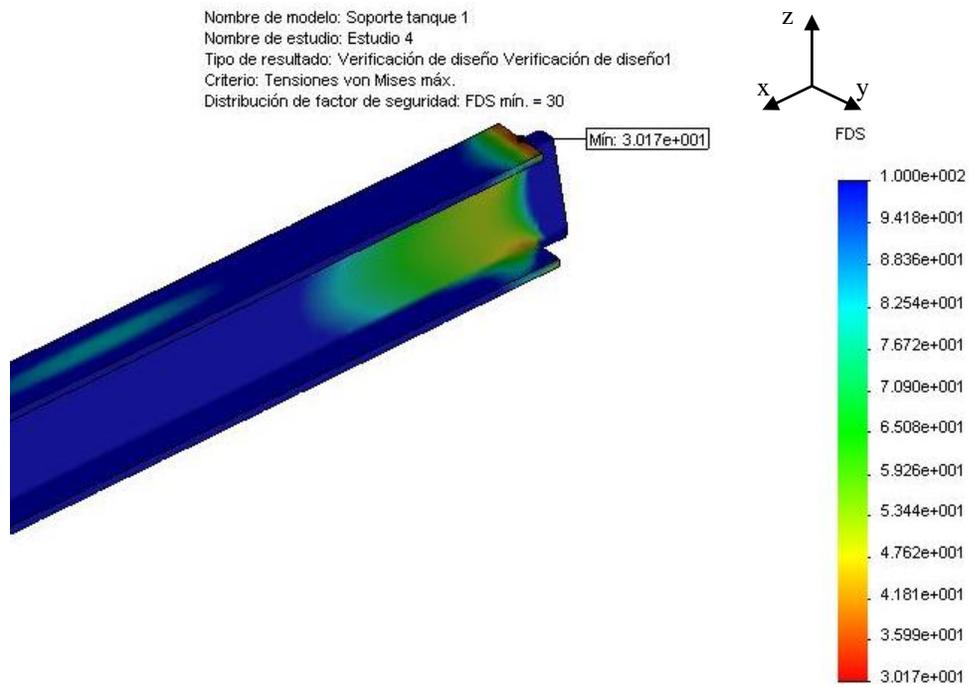


Figura 4.33 Distribución del factor de seguridad en la pieza.

4.7.5. Diseño del soporte del tanque 2.

El soporte del tanque 2 está constituido por 4 vigas de perfil “L” de 50mm de ancho de acero estructural ASTM A-36, que forman una estructura cuadrada que se adapta al fondo del tanque; tal como puede observarse en la figura 4.34. El tanque está apoyado sobre dos vigas de la estructura principal distribuyendo su peso uniformemente.

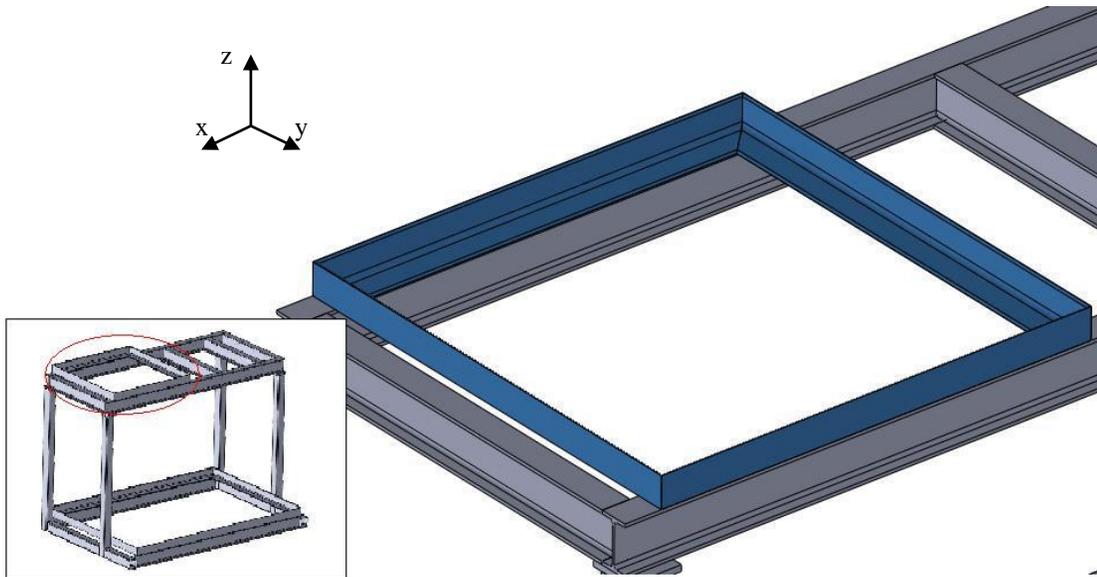


Figura 4.34 Soporte del tanque 2.

Se procedió entonces a aplicar la carga sobre la pieza, de manera normal, y en el sentido negativo de la dirección ortogonal “z”, y se restringieron los desplazamientos en las 3 direcciones ortogonales de las caras donde irá sujeta la pieza a la estructura general mediante soldadura. Esto puede ser observado en la figura 4.35.

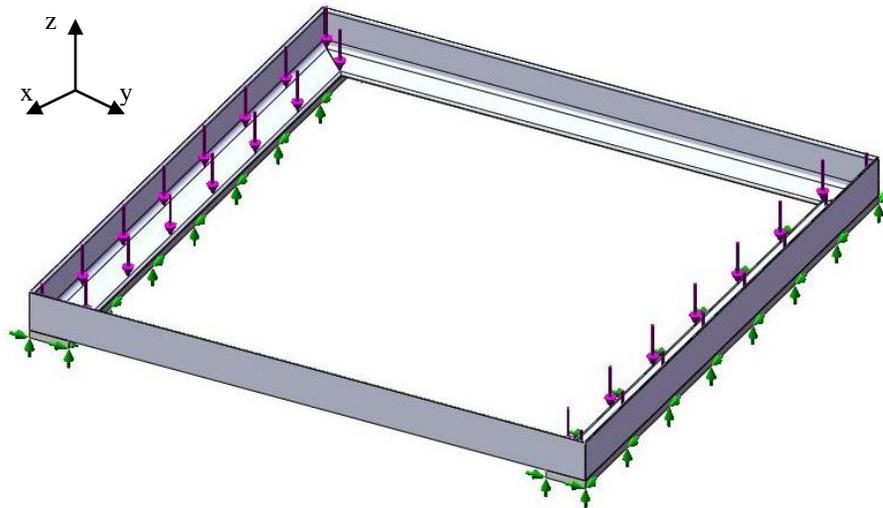


Figura 4.35 Fuerzas y restricciones aplicadas al soporte del tanque 2.

En la figura 4.36 se puede apreciar la representación gráfica de los puntos obtenidos en las diferentes iteraciones. Se puede observar que existe una tendencia hacia un valor, siendo éste $1,453 \times 10^5$ Pa, por lo que se puede considerar que convergen. Se escogen los resultados arrojados en la iteración número 5 ya que para este, el error con respecto a la iteración anterior es menor al 5%, además que se encuentra en la parte más estable de la curva.

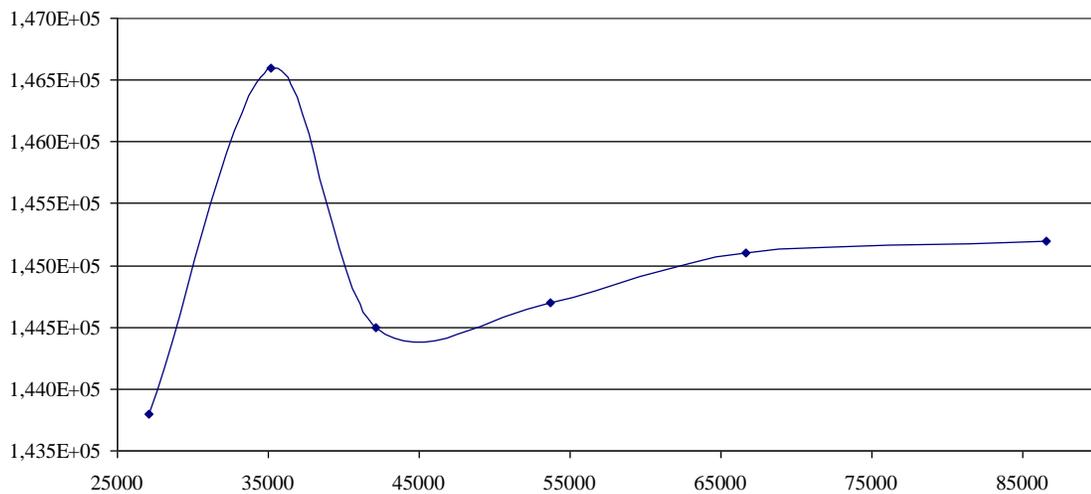


Figura 4.36 Curva de convergencia del esfuerzo máximo de von Mises con el número de nodos de la malla aplicada.

En la figura 4.37 correspondiente a los resultados de la quinta iteración, se puede observar la distribución de las tensiones máximas de von Mises a lo largo de toda la pieza mientras es sometida al estado de esfuerzos. Se puede observar que existe un concentrador de esfuerzos en la arista correspondiente a la soldadura donde se unen los perfiles entre sí. En estos puntos, la tensión de von Mises presenta un valor de $1,451 \times 10^5$ Pa que es menor a la máxima tensión admisible para electrodos 6013 equivalente a $4,137 \times 10^8$ Pa, lo que significa que la soldadura es capaz de resistir los esfuerzos producidos.

En la figura 4.38 que también corresponde a los resultados de la iteración número 5, se puede observar la distribución del factor de seguridad a lo largo de la pieza, mostrándose el mínimo en el concentrador de tensiones que se ha descrito anteriormente. Éste factor de seguridad mínimo, tiene un valor de 1594,76 siendo mucho mayor a 2. Por lo que se puede concluir a través de este estudio que la pieza es capaz de soportar los esfuerzos a los que estaría sometida durante el funcionamiento del sistema.

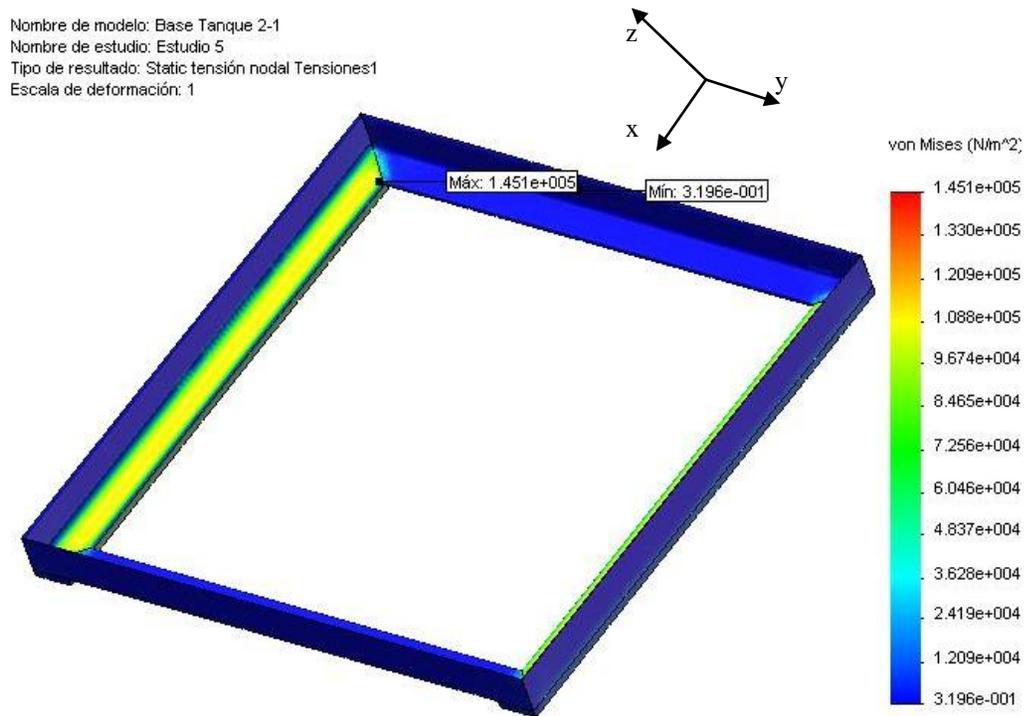


Figura 4.37 Distribución de las tensiones de von Mises en la pieza.

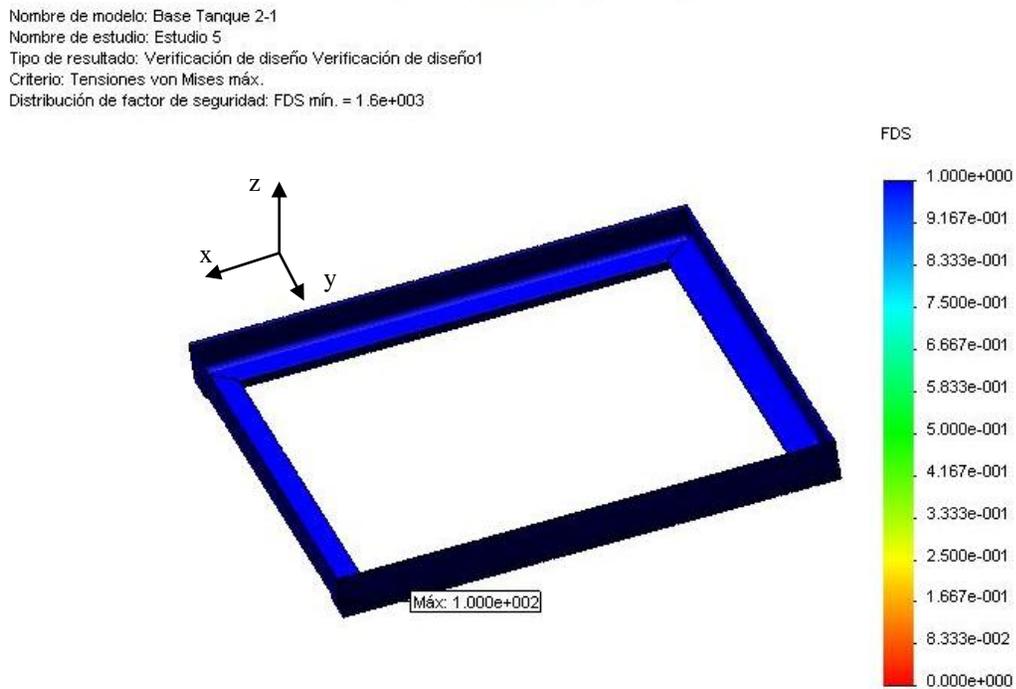


Figura 4.38 Distribución del factor de seguridad en la pieza.

4.7.6. Diseño de las columnas de la estructura de soporte de los tanques 1 y 2.

Las columnas son cuatro tubos de perfil cuadrado, de 60mm de lado, de acero estructural ASTM A-36, sobre las cuales se coloca una lamina cuadrada para permitir la unión soldada con las vigas principales; tal como puede observarse en la figura 4.39.

Se procedió entonces a aplicar la carga sobre la pieza, en la lámina de manera normal, y en el sentido negativo de la dirección ortogonal “z”, y se restringieron los desplazamientos en las 3 direcciones ortogonales de las caras donde irá sujeta la estructura al suelo, en la cara inferior de la columna, tal como se observa en la figura 4.40.

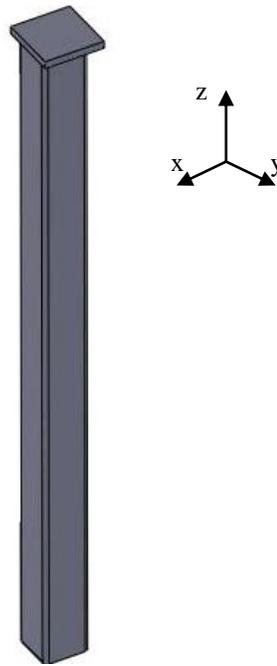


Figura 4.39 Columna de la estructura principal.

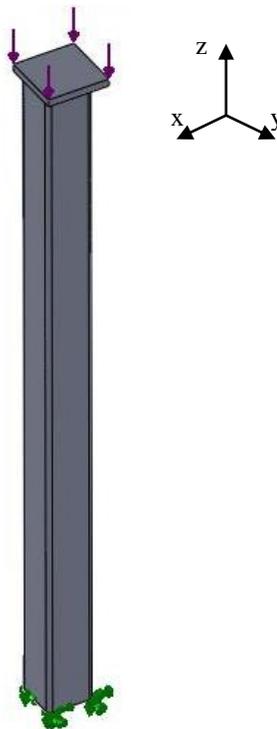


Figura 4.40 Fuerzas y restricciones aplicadas a la columna de la estructura principal.

En la figura 4.41 se puede apreciar la representación gráfica de los puntos obtenidos en las diferentes iteraciones. Se puede observar que existe una tendencia hacia un valor, siendo éste $7,400 \times 10^6$ Pa, por lo que se puede considerar que convergen. Se escogen los resultados arrojados en la iteración número 4 ya que para este, el error con respecto a la iteración anterior es menor al 5%, además que se encuentra en la parte más estable de la curva.

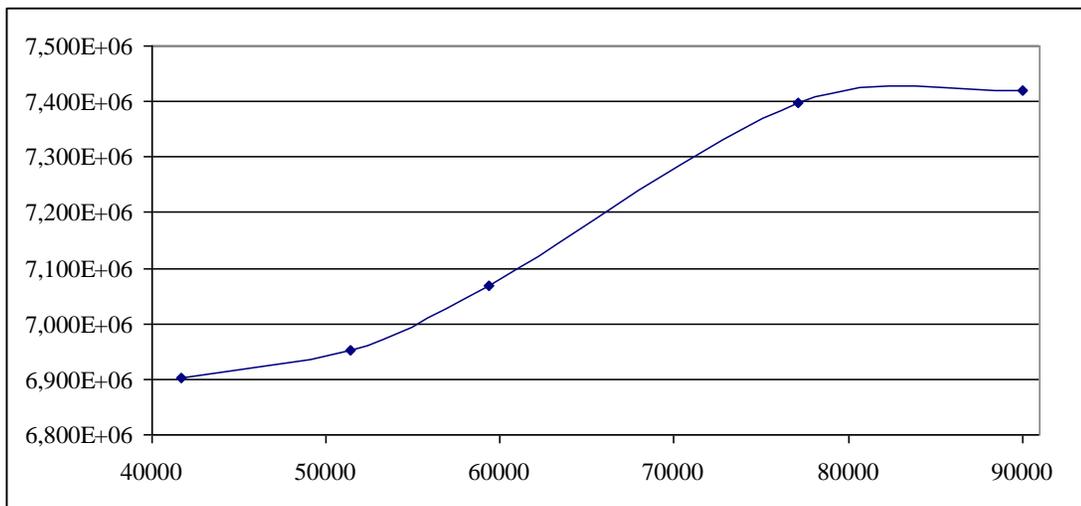


Figura 4.41 Gráfico Esfuerzo máximo de von Mises relacionado con el número de nodos.

En la figura 4.42 correspondiente a los resultados de la cuarta iteración, se puede observar la distribución de las tensiones de von Mises a lo largo de toda la pieza mientras es sometida al estado de esfuerzos. Se puede observar que existe un concentrador de esfuerzos en la cara interna de la columna en el área donde se une el tubo cuadrado con la lámina. En estos puntos, la tensión de von Mises presenta un valor de $7,397 \times 10^6$ Pa que es menor a la máxima tensión admisible para electrodos 6013 equivalente a $4,137 \times 10^8$ Pa, lo que significa que la soldadura es capaz de resistir los esfuerzos producidos.

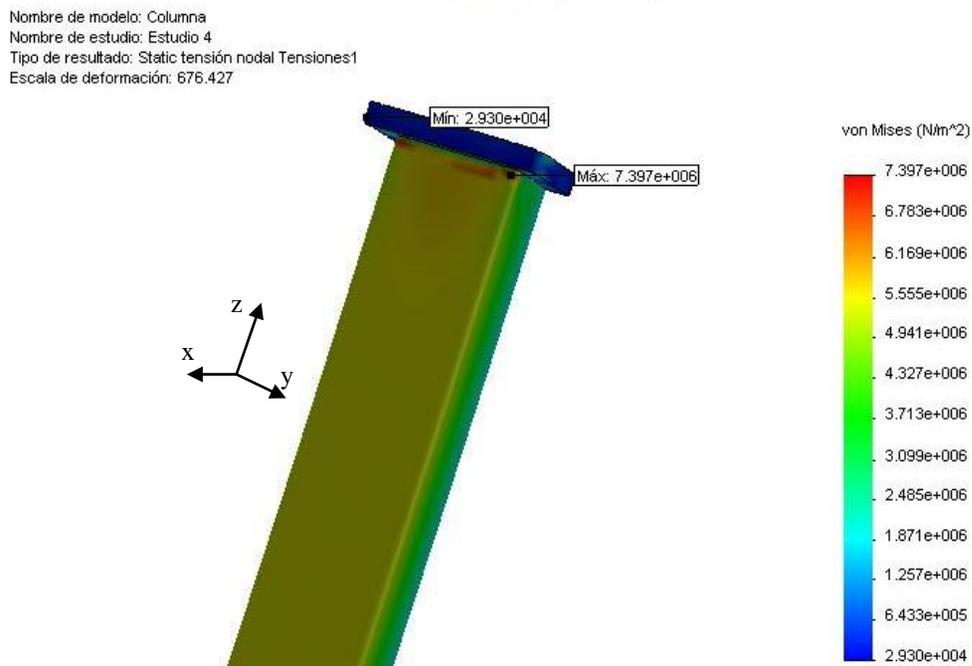


Figura 4.42 Distribución de las tensiones de von Mises en la pieza.

En la figura 4.43 que también corresponde a los resultados de la iteración número 4, se puede observar la distribución del factor de seguridad a lo largo de la pieza, mostrándose el mínimo en el concentrador de tensiones que se ha descrito anteriormente. Éste factor de seguridad mínimo, tiene un valor de 30,63 siendo mucho mayor a 2. Por lo que se puede concluir a través de este estudio que la pieza es capaz de soportar los esfuerzos a los que estaría sometida durante el funcionamiento del sistema.

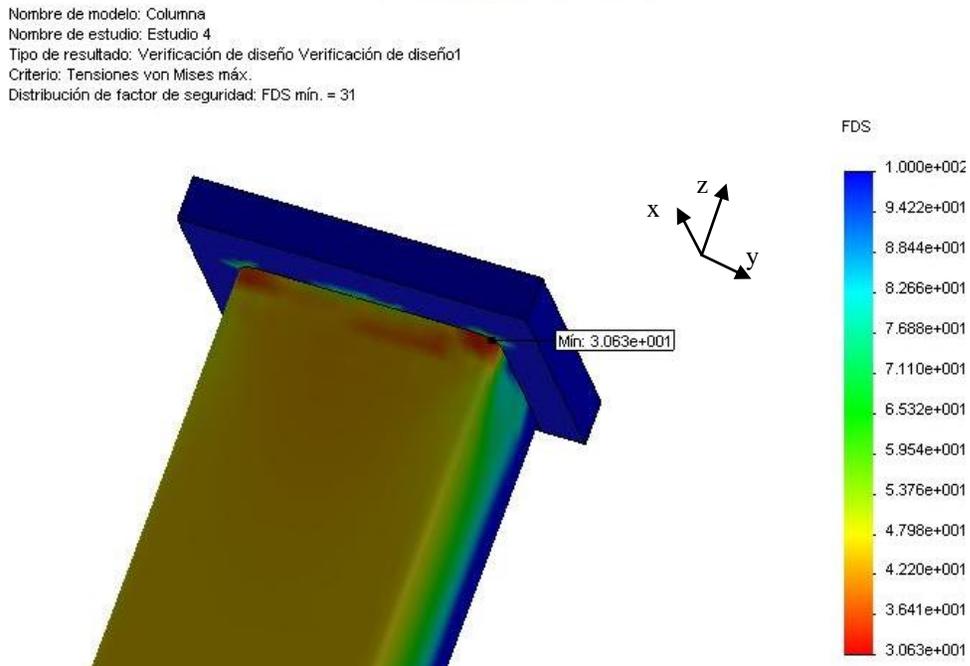


Figura 4.43 Distribución del factor de seguridad en la pieza.

4.7.7. Diseño de las vigas principales.

Son dos vigas de perfil IPE 180, de acero estructural ASTM A-36, sobre las cuales se colocan los soportes de los tanques 1 y 2, estas vigas van unidas a las columnas a través de soldadura con la lamina cuadrada; tal como puede observarse en la figura 4.44.

Se procedió entonces a aplicar las cargas sobre la pieza, en las áreas donde van colocados los soportes de los tanques 1 y 2, en el sentido negativo de la dirección ortogonal “z”, y se restringieron los desplazamientos en las 3 direcciones ortogonales de las caras donde irá sujeta la viga a la columna, tal como se observa en la figura 4.45.

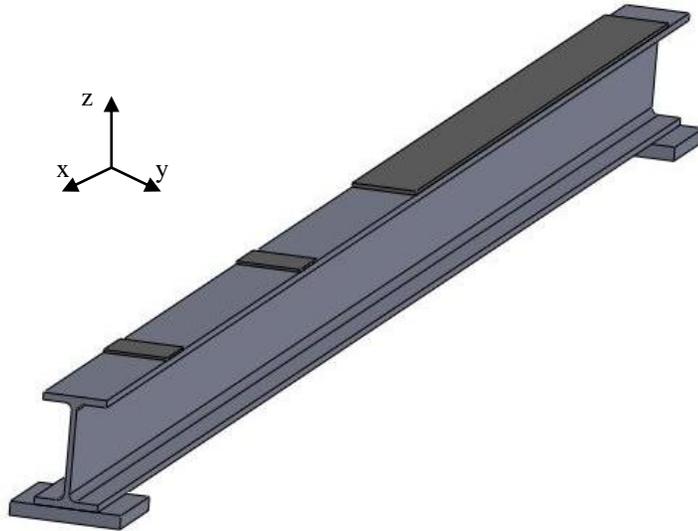


Figura 4.44 Vigas principales de la estructural.

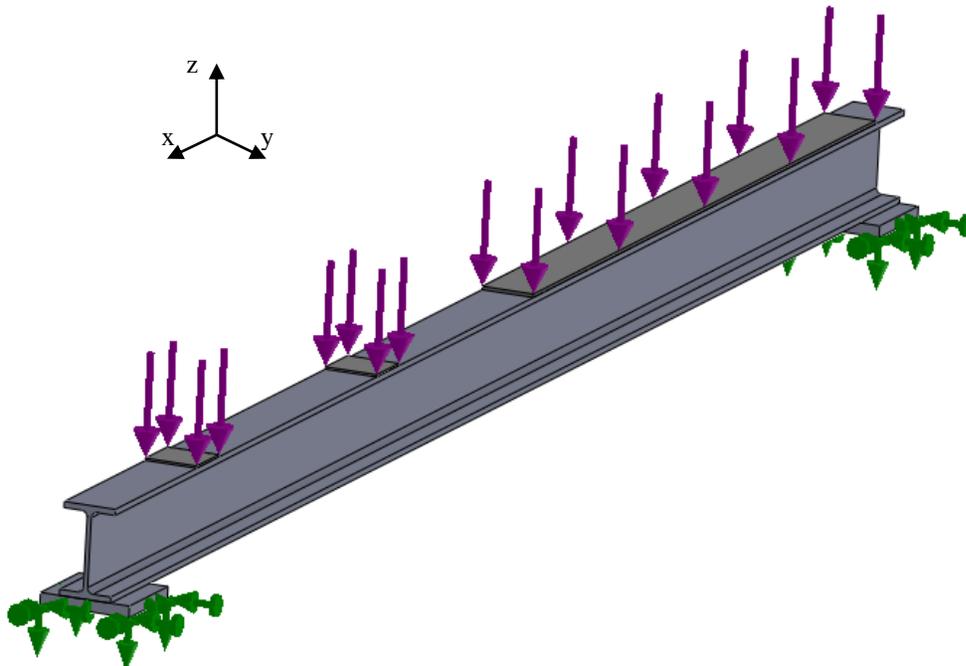


Figura 4.45 Fuerzas y restricciones aplicadas a la viga principal de la estructura.

En la figura 4.46 se puede apreciar la representación gráfica de los puntos obtenidos en las diferentes iteraciones. Se puede observar que existe una tendencia hacia un valor, siendo éste $5,220 \times 10^6$ Pa, por lo que se puede considerar que

convergen. Se escogen los resultados arrojados en la iteración numero 4 ya que para este, el error con respecto a la iteración anterior es menor al 5%, además que se encuentra en la parte más estable de la curva.

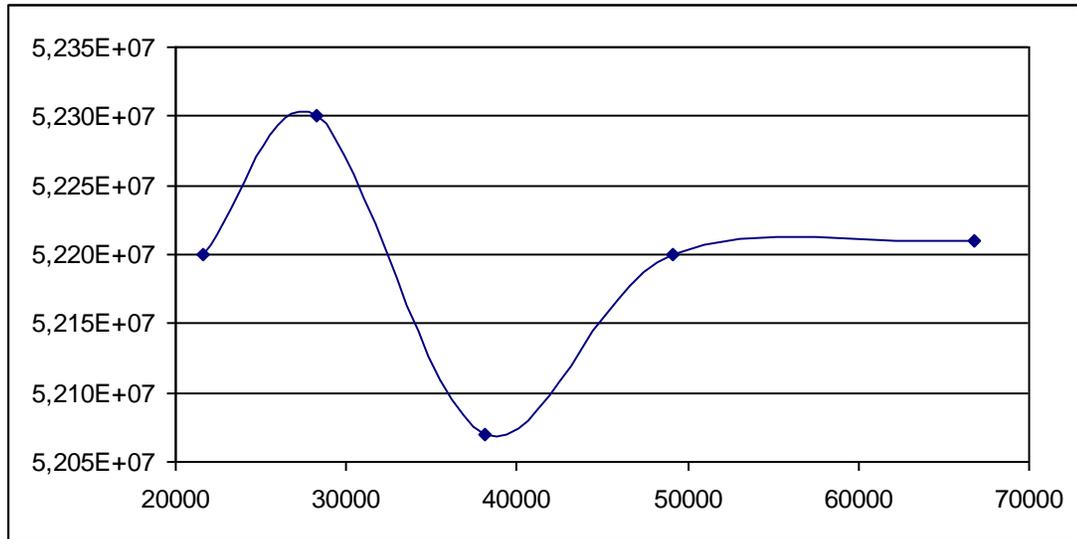


Figura 4.46 Gráfico Esfuerzo máximo de von Mises relacionado con el número de nodos.

En la figura 4.47 correspondiente a los resultados de la cuarta iteración, se puede observar la distribución de las tensiones de von Mises a lo largo de toda la pieza mientras es sometida al estado de esfuerzos. Se puede observar que existe un concentrador de esfuerzos en la cara externa de la viga, en la zona del redondeo del alma de la viga. En estos puntos, la tensión de von Mises presenta un valor de $5,221 \times 10^7$ Pa que es menor a la máxima tensión admisible para electrodos 6013 equivalente a $4,137 \times 10^8$ Pa, lo que significa que la soldadura es capaz de resistir los esfuerzos producidos.

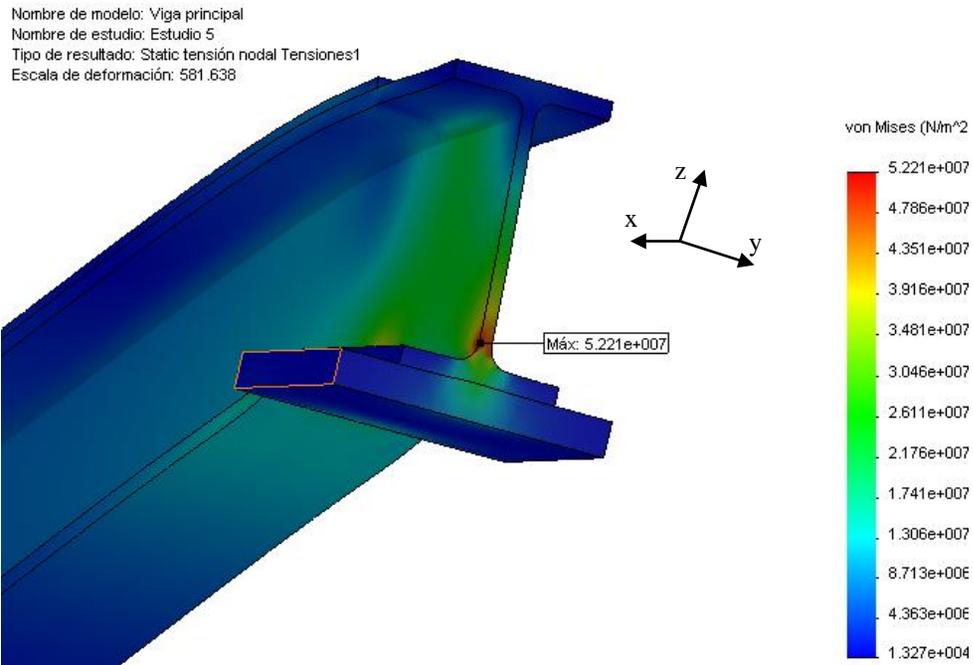


Figura 4.47 Distribución de las tensiones de von Mises en la pieza.

En la figura 4.48 que también corresponde a los resultados de la iteración número 4, se puede observar la distribución del factor de seguridad a lo largo de la pieza, mostrándose el mínimo en el concentrador de tensiones que se ha descrito anteriormente. Éste factor de seguridad mínimo, tiene un valor de 4,76 siendo mucho mayor a 2. Por lo que se puede concluir a través de este estudio que la pieza es capaz de soportar los esfuerzos a los que estaría sometida durante el funcionamiento del sistema.

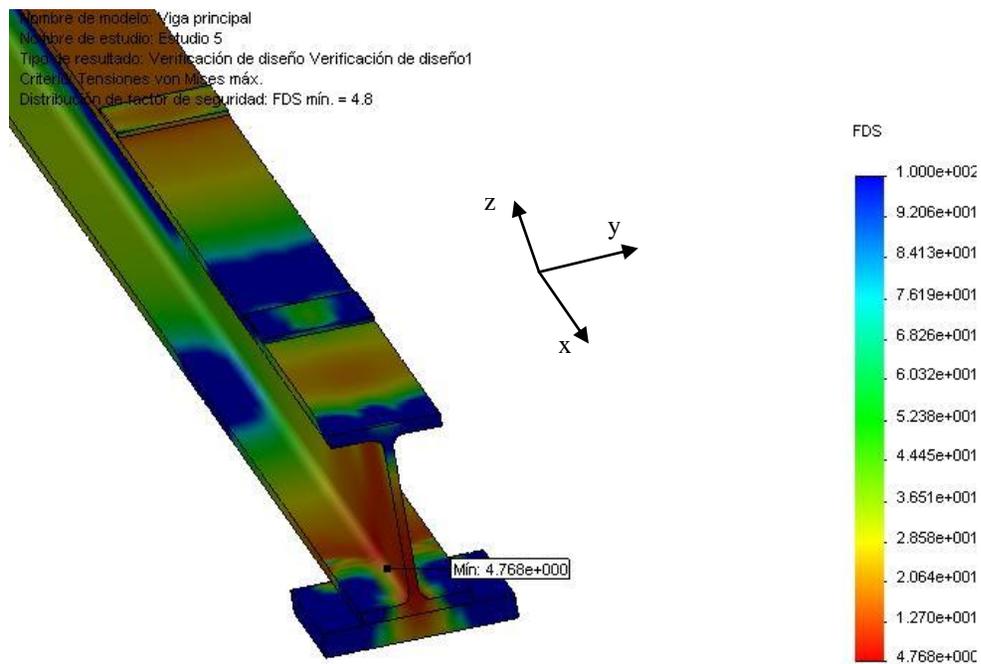


Figura 4.48 Distribución del factor de seguridad en la pieza.

4.7.8. Diseño de la estructura soporte de los tanques 1 y 2.

Este estudio se basa en la comprobación del diseño de la estructura que soporta a los tanques 1 y 2, para lo cual se procedió a realizar el modelo de todas las piezas ensambladas incluyendo las fuerzas o cargas a las que estarán sometidos cada uno de los soportes. En la figura 4.49 y 4.50, se pueden observar las fuerzas aplicadas sobre los soportes de los tanques 1 y 2, respectivamente; ambas fuerzas aplicadas, en dirección normal a las superficies, en el sentido negativo de la dirección ortogonal “Z”.

En la figura 4.51 se pueden observar las restricciones aplicadas a la estructura donde, se restringieron los desplazamientos en las 3 direcciones ortogonales de las caras inferiores, ya que esta estructura irá fijada al suelo.

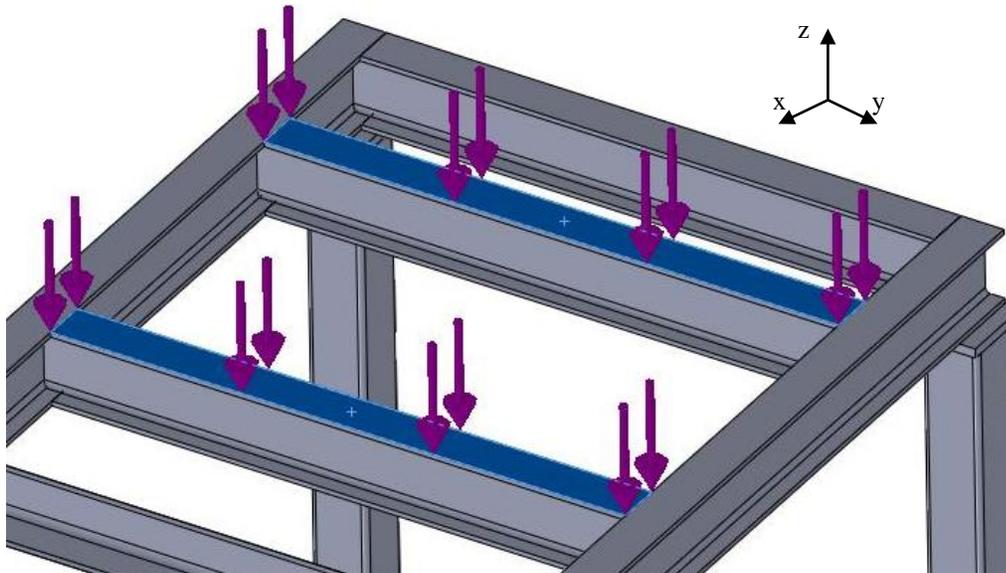


Figura 4.49 Fuerza aplicada sobre el soporte del tanque 1.

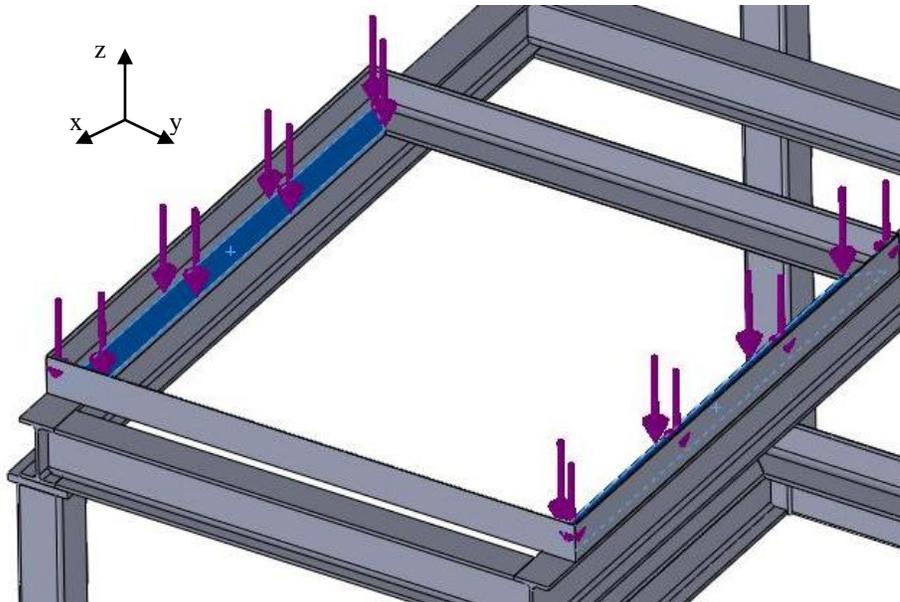


Figura 4.50 Fuerza aplicada sobre el soporte del tanque 2

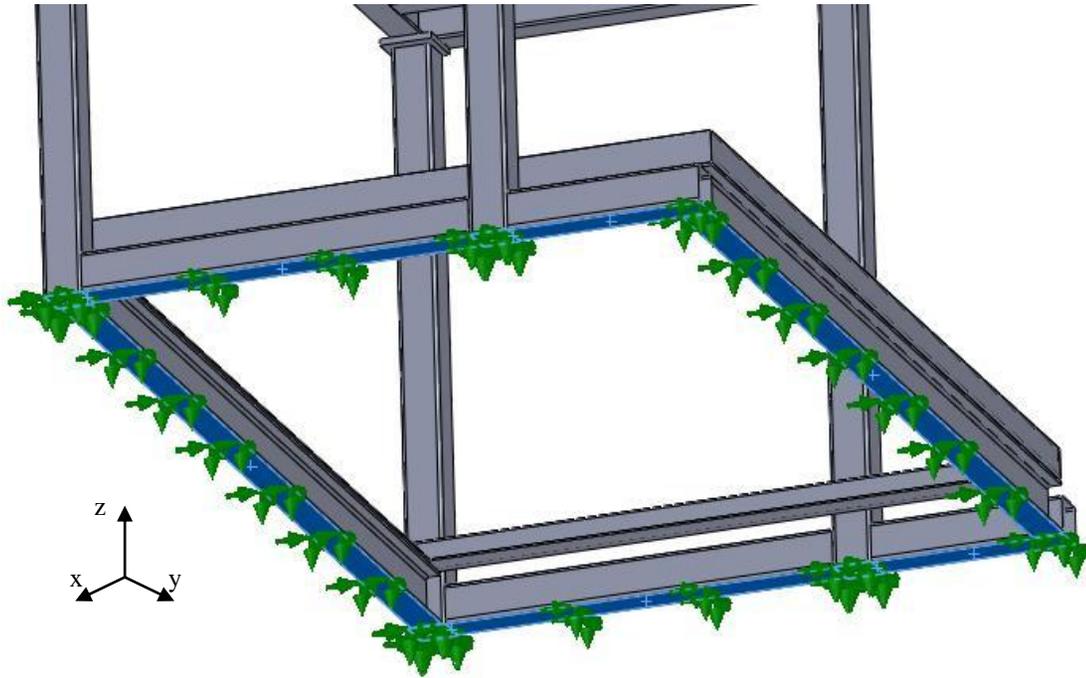


Figura 4.51 Restricciones aplicadas a la estructura.

En la figura 4.52 se puede apreciar la representación gráfica de los puntos btenidos en las diferentes iteraciones se puede observar que existe una tendencia hacia un valor, siendo éste $9,870 \times 10^7$ Pa, por lo que se puede considerar que convergen.

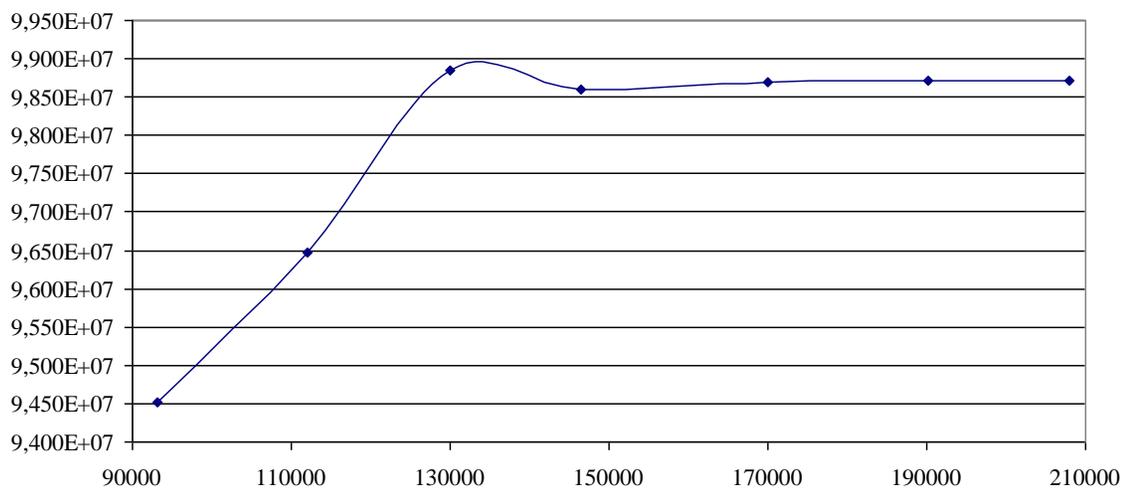


Figura 4.52 Gráfico Esfuerzo máximo de von Mises relacionado con el número de nodos.

Se escogen los resultados de la iteración número 5 ya que para esta, el error con respecto a la iteración anterior es menor al 5%, además que se encuentra en la parte más estable de la curva.

En la figura 4.53 correspondiente a los resultados de la quinta iteración, se puede observar la distribución de las tensiones máximas de von Mises en la estructura mientras es sometida al estado de esfuerzos. Se puede observar que existe un concentrador de esfuerzos en el alma de la viga en la cara externa. En estos puntos, la tensión de von Mises presenta un valor de $9,869 \times 10^5$ Pa. De este resultado se puede concluir que en las zonas de soldadura el esfuerzo es menor, por lo tanto la soldadura es capaz de resistir los esfuerzos producidos ya que la máxima tensión admisible para electrodos 6013 equivalente a $4,137 \times 10^8$ Pa.

En la figura 4.54 que también corresponde a los resultados de la iteración número 5, se puede observar la distribución del factor de seguridad en la estructura, ubicándose el factor de seguridad mínimo, en la misma área del concentrador de tensiones que se ha descrito anteriormente. Éste factor de seguridad mínimo, tiene un valor de 2,533 siendo mayor a 2. Por lo que se puede concluir a través de este estudio que la estructura es capaz de soportar los esfuerzos a los que estaría sometida durante el funcionamiento del sistema.

CAPÍTULO IV – DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA PLANTEADO

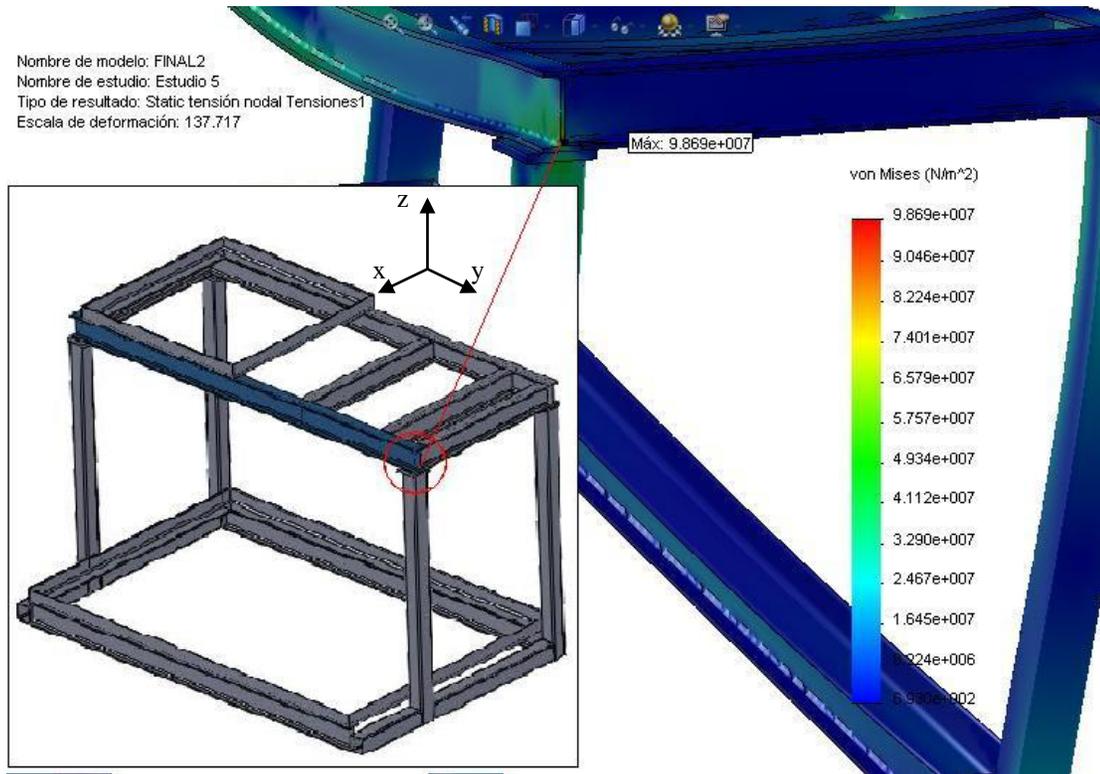


Figura 4.53 Distribución de las tensiones de von Mises en la estructura.

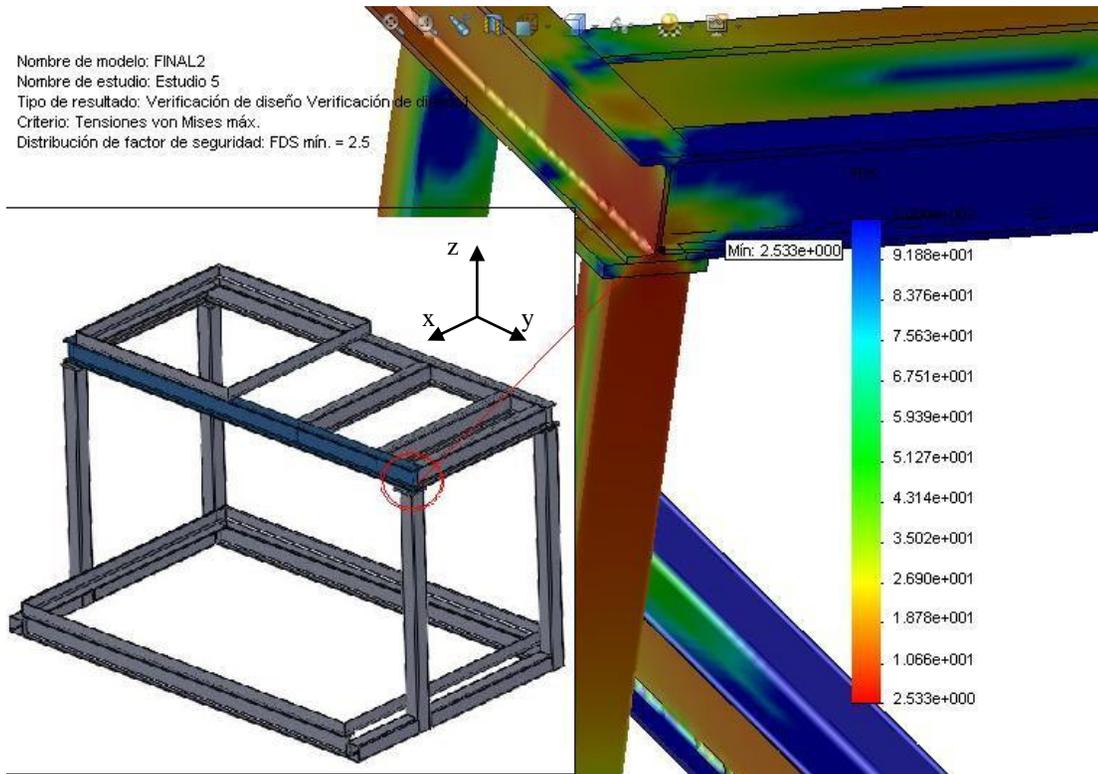


Figura 4.54 Distribución del factor de seguridad en la estructura.

4.8. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.

A continuación se muestran los resultados de los cálculos realizados y los criterios utilizados para la selección o diseño de cada uno de los elementos que componen el sistema de control.

4.8.1. Memoria descriptiva.

El proceso a controlar consiste en 3 tanques que contienen agua como se ha descrito anteriormente, el tanque 1 será utilizado para ajustar la presión de la columna de agua a un valor constante. En el tanque 2 se realizará la regulación de la temperatura del líquido que almacena, y por último el tanque 3 será utilizado como

reservorio para el suministro de agua a los tanques 1 y 2 mediante el sistema de tuberías planteado. A cada tanque se le realizará un control de nivel.

La bomba tendrá dos puntos de trabajo a diferentes velocidades de giro, uno para realizar el llenado del tanque 1 y otro para el tanque 2; esto debido a la gran diferencia de disponibilidades entre los tanques 1 y 2, que hace necesario el llenado individual de cada tanque. Para lograr esto es necesaria la incorporación de un variador de frecuencia.

Se incorporará una placa orificio en el tramo de descarga de la bomba, para realizar una medición de caudal.

Adicionalmente, se incorporará una válvula de control que funcionará como elemento final de control en lazos de control de nivel

4.8.2. Filosofía de control.

En el tanque 1, se utilizará un interruptor de presión para la medición puntual de presión en el volumen del tanque no lleno de líquido y ajuste de la misma mediante un control on-off, manipulando la entrada de aire al tanque. Adicionalmente se realizará la medición de presión diferencial en este tanque con la finalidad de contar con un lazo de medición de nivel.

Para la regulación de temperatura del tanque 2 se empleará un lazo conformado por sondas de resistencias (RTD) y termocuplas como transductores de temperatura conectados a transmisores de temperatura para el conocimiento de esta variable en el tanque la cual será manipulada mediante el ajuste de la intensidad de corriente que circula a través de una resistencia de calefacción. En el tanque 2 se dispondrá además

de una sonda capacitiva para medición continua de nivel que podrá ser controlado mediante la manipulación del caudal de entrada al tanque.

El tanque 3 cuenta con un medidor de nivel de cristal en conexión al tanque de tipo bypass y además de un interruptor de nivel tipo flotador con el cual se detectará cuando el tanque se encuentra en el nivel mínimo para evitar la operación de la bomba en condiciones desfavorables.

Las válvulas que permiten el paso de líquido de los tanques 1 y 2 hacia el tanque 3 serán manuales, al igual que las válvulas que permiten el llenado independiente de los tanques.

El sistema incorporará una placa orificio que se utilizará para la medición del caudal, a través de la medición directa de la presión diferencial que ella produce. Esta medición del flujo, será utilizada para realizar un lazo de control de nivel en cascada para el tanque 1, donde las variables medidas serán el nivel del tanque y el caudal la variable manipulada. Además, la placa será incorporada como elemento primario en un lazo de control de flujo donde la variable medida será el caudal, y la variable a manipular será el mismo caudal mediante un ajuste de la velocidad de giro de la bomba, mediante un variador de frecuencia con el que será posible controlar de manera remota los dos puntos de trabajo de la bomba. Para lograr la manipulación del arranque, la parada y la velocidad de giro de la bomba, se incorporará al sistema un variador de frecuencia.

4.8.3. Ingeniería conceptual.

El proceso se controlará mediante un sistema de adquisición de datos SAD, o DAS de sus siglas en inglés. De los instrumentos de medición se obtendrán salidas analógicas que serán acondicionadas e introducidas a un multiplexor para luego ser

convertidas en señales digitales que finalmente podrán ser observadas y manipuladas en 4 computadores. Luego las señales de control provenientes del DAS en forma digital son transformadas en analógicas, y por último introducidas al respectivo elemento final de control. Cabe destacar que en el mercado existen equipos compactos de adquisición de datos que ejercen funciones de multiplexor, “sample and hold”, y conversor de señales analógicas a digitales y viceversa (A/D y D/A).

Luego una tarjeta PCI compatible con el sistema de adquisición de datos (normalmente suministrada por el mismo proveedor), conectada directamente en la tarjeta madre de cada computador, en conjunto con el software de procesamiento de datos hará posible la comunicación entre los dispositivos.

La topología utilizada para la red de conexión entre los computadores, será “Bus en estrella”. En este caso la red es un bus que se cablea físicamente como una estrella por medio de concentradores, esto permitirá que en todas las estaciones o computadores se observe la misma información, y en caso de haber algún problema de comunicación entre alguna de las estaciones y el sistema de adquisición de datos, no se verá comprometida la comunicación de las demás estaciones, permitiendo mantener siempre al menos una estación de control conectada al sistema de adquisición de datos. Para lograr esta topología, se hace necesaria la inclusión de un convertidor de conexión RS485 a Ethernet, y un concentrador o “Hub”.

4.8.4. Ingeniería básica.

El diagrama de tuberías e instrumentación, y los diagramas de lazo se presentan en los anexos número 6, enumerados del 1 al 10. Estos diagramas fueron realizados, consultando los manuales de los equipos preseleccionados, con ayuda de asesoría técnica de los proveedores de los equipos.

4.8.5. Selección de elementos primarios, transmisores y elementos finales para lazos de control de temperatura.

Para la medición de temperatura, se consideraron dos posibles tecnologías: dispositivos termo resistivos (RTD) y termocuplas. Debido al rango de temperaturas que se maneja en el tanque 2 comprendido entre 55°C y 65°C se pueden utilizar cualquier tipo de termocupla disponible (tipo J, T, K, E, S, R, B), ya que la temperatura se encuentra comprendida dentro del rango de medida de estos transductores. Sin embargo, las termocuplas tipo J (hierro-constantán) serían la mejor elección, ya que su rango de aplicación es adecuado, además de presentar para éste mismo rango de temperaturas una mejor precisión, que los demás tipos de termocuplas. La termocupla estará instalada en un termopozo de acero inoxidable 316, ya que se recomienda debido a su resistencia a la corrosión garantiza una mayor durabilidad.

En cuanto a los dispositivos termo-resistivos (RTD), la opción sería los de tipo Pt-100, de platino, puede seleccionarse un RTD de clase “A”, con una configuración de 3 hilos, que ofrece mejor precisión al compensar los efectos de los cables de extensión. De igual manera la RTD se encontrará en un termopozo de acero inoxidable 316, acoplado al tanque.

Se incluyen ambos elementos de medición debido al carácter didáctico de este diseño, permitiendo hacer comparaciones de tiempos de respuesta, y dándole la versatilidad requerida al sistema. Los termopozos tendrán una extensión (“T”) de 1” y longitud de inmersión (“U”) de 9.5”, con conexiones roscadas de ½ NPT.

Se seleccionaron transmisores de temperatura cuya salida sea de 4-20 mA, permitiendo su fácil adaptación a un sistema general de adquisición de datos. Sin embargo, la razón de la inclusión de estos dispositivos al sistema de control es

nuevamente el carácter didáctico del sistema, y al uso que tienen las señales normalizadas de corriente en control, a pesar de que muchos sistemas de adquisición de datos permiten la entrada directa de señales provenientes de RTDs y termocuplas. Estos equipos, permiten obtener las señales de la termocupla, y de la RTD. Se seleccionó el mismo modelo para ambas aplicaciones, con la única diferencia de la cantidad de terminales de entrada, ya que para la termocupla se necesitan 2 y para la RTD se necesitan 3 por se de 3 hilos. Estos dispositivos ofrecen la posibilidad de calibrarse a través de un programa computarizado.

Para el calentamiento del fluido se seleccionó una resistencia de cobre hecha a pedido, con alimentación 120 VAC, con capacidad de 0 a 100W de potencia, irá acoplada al tanque mediante una rosca de $\frac{3}{4}$ de pulgada NPT de PVC que resiste hasta 90°C. La potencia de salida de la resistencia será controlada por un controlador de corriente, modelo SCR –Z19 Power Controller de la marca omega, que recibe señales analógicas de 4-20 mA.

Las características técnicas de todos estos elementos seleccionados pueden encontrarse en los Anexos 7 y 8, donde se muestran los modelos y marcas seleccionadas.

4.8.6. Selección de elementos primarios, y transmisores para lazos de control de nivel.

Para la determinación de nivel en el tanque 1, se consideró necesaria la medición continua de nivel mediante la medición directa de la presión diferencial ocasionada por la diferencia de altura en el nivel del líquido, esta diferencia corresponde a un rango entre 0 y 5 psi, o lo que equivale a 0 y 138,53 pulg H₂O. Por lo que se seleccionó el modelo de transmisor de presión diferencial marca Honeywell con un

rango de medida entre 0 y 400 pulg H₂O, precisión de 0.075% del span calibrado, salida de 4 – 20mA, y alimentación de 24 V DC.

Para el tanque 2 se consideró también, la medición continua del nivel, en este caso, se utiliza una sonda capacitiva, de alimentación de 24 V Dc y salida de 4-20 mA. Esta sonda capacitiva debe tener un electrodo de referencia, debido a que el tanque esta hecho de acrílico. En cuanto al material de construcción, se seleccionó acero inoxidable debido a que garantiza su durabilidad. La longitud total de inmersión e de 27,56 pulgadas, y la longitud activa es de 20 pulgadas. La conexión al tanque será de rosca ½ NPT.

En el tanque 3 se estableció como requerimiento la detección de nivel debería ser puntual, y ésta se hace mediante un interruptor de nivel de tipo flotante ubicado en el nivel mínimo para el cual la bomba no trabajará en condiciones desfavorables. Este interruptor tiene una alimentación de 24 VDC, y puede ser conectado de manera tal que su contacto asociado (REED) pueda estar activado en condición de reposo o desactivado, siendo el segundo estado el deseado para la aplicación. Adicionalmente se incluye un visor de nivel de cristal, aunque el tanque es de acrílico las variaciones en el nivel se observarán mejor en el visor, debido a que no son tan susceptibles a las perturbaciones de flujo presentes en el resto del tanque. Este último elemento, será fabricado con válvulas de 90°, y un tubo de acrílico, cabe destacar que no se seleccionó un modelo comercial, debido a que no la importancia del instrumento no lo amerita, y es de fácil construcción.

Las características técnicas de todos estos elementos seleccionados pueden encontrarse en los Anexos 7 y 8, donde se muestran los modelos y marcas seleccionadas.

4.8.7. Selección de elementos primarios, y transmisores para lazos de control de presión.

Se hará la medición y detección de la presión estática del volumen del tanque 1 no lleno de líquido, donde la presión máxima alcanzada es de 80 psi. Para esto se seleccionó un manómetro de rango (0-100)psi, marca Ashcroft, de dial de 4,5 pulgadas, y conexión de ½” NPT y precisión de 0.5% del span.

Se seleccionó un presostato, que será activado de acuerdo con la presión en el volumen no lleno de líquido del tanque 1, lo que permitirá realizar el control on-off. Este presostato, tiene una conexión roscada de 1/8 NPT, es de alimentación de 24VDC, de contacto normalmente abierto. Es un presostato, compacto, de poco peso, y gran tecnología electrónica, que puede ser instalado en cualquier posición, y es ampliamente usado en aplicaciones de neumática.

Se hará la medición e indicación puntual de la presión de la línea, a la entrada y la salida de la válvula de control, esto con finalidad didáctica. Los manómetros seleccionados son marca Ashcroft, de dial de 4.5 pulgadas de diámetro con conexión roscada de ½ NPT, y 0,5% del span de precisión. Para el punto antes de la válvula se seleccionó el manómetro con un rango de 0-30psi, ya que la presión máxima en éste punto será de 25psi. Para el punto después de la válvula de control, se seleccionó un manómetro de 0-15 psi, ya que para este punto la presión máxima en este punto será de 7 psi.

Existirán dos reguladores de presión del aire que entra a la planta piloto, uno regulará la presión a 80psi para alimentar de aire al tanque 1, y el otro la regulará a 20 psi, que es la presión de suministro requerida, por el convertidor I/P de la válvula de control. Estos reguladores, incluyen filtro, lubricador, y un pequeño manómetro. Este

tipo de regulador tiene un dial selector con bloqueo antimanipulación. Conexión roscada 1/8 NPT.

El convertidor I/P seleccionado, trabaja con señales analógicas eléctricas y neumáticas comprendidas entre los rangos de entrada de 4- 20 mA, y rangos de salida de 3- 15 psi, con alimentaciones de 24VDC y 20 psi respectivamente. Se seleccionó este convertidor I/P por que utiliza señales analógicas, es compacto, y ampliamente aplicado en sistemas de control.

Las características técnicas de todos estos elementos seleccionados pueden encontrarse en los Anexos 7 y 8, donde se muestran los modelos y marcas seleccionadas.

4.8.8. Selección de elementos primarios, y transmisores para lazos de control de caudal.

Se seleccionó una placa orificio concéntrica ya que es la recomendada para aplicaciones con fluidos en una sola fase sin partículas en suspensión, con un β de 0,5 para generar una caída de presión apreciable, y tomas de presión en las bridas, ya que es lo que se recomienda cuando el diámetro de la tubería es menor a 2 pulgadas. El espesor de la placa es de 3mm y fabricada en acero inoxidable 316. El borde del orificio debe ser biselado a 45°. La caída de presión generada por esta placa orificio cuando se efectúa el llenado del tanque 2 es de 9,88 pulgadas de agua, y para el llenado del tanque 1 es de 55, 5 pulg H₂O.

Para la medición de la caída de presión generada por la placa orificio, se utilizará un medidor de presión diferencial, Honeywell, con un rango de aplicación de 0 a 400 pulgadas de agua con una precisión de 0,075% del span calibrado, salida analógica de 4-20 mA y alimentación de 24 VDC.

Las características técnicas de todos estos elementos seleccionados pueden encontrarse en los Anexos 7 y 8, donde se muestran los modelos y marcas seleccionadas.

4.8.9. Selección de válvulas de control.

Se seleccionó una válvula solenoide de 3/2 vías para la regulación de la entrada de aire al tanque 1, esto con la finalidad de que haya un alivio de presión cuando la válvula esta cerrada. La válvula se seleccionó normalmente cerrada, debido a que de esta manera, no permitirá la entrada de aire al tanque en caso de falla. La válvula es de marca ACL de alimentación a 24 VDC. Se seleccionó este tipo de válvula, ya que son específicas para controles on-off, ampliamente utilizadas en sistemas neumáticos.

Se seleccionó una válvula de control de dos vías con accionamiento neumático, de tipo globo, marca Honeywell, con conexiones roscadas de ½ NPT, el cuerpo de la válvula es de ½ pulgada, ya que es el diámetro de la tubería. El Cv es 1,084 correspondiente al calculado en el apéndice 1. Con un trim de 20mm de tipo isoporcentual. Se seleccionó este tipo de válvula, porque permite realizar una mejor regulación del caudal, y son las más comunes en este tipo de sistemas.

4.8.10. Selección del variador de frecuencia.

Se seleccionó un dispositivo, que permite modificar la frecuencia eléctrica entre 0 y 600 Hz, para velocidades de giro entre 0 y 5500rpm. Posee 1 entrada analógica, y 6 entradas digitales, es un equipo versátil y compacto, que permite su adaptación a un sistema de control como este. El rango de frecuencias a utilizar es de 33,33 – 60 Hz

para una velocidad de giro del motor de la bomba de 1700rpm, y de 3500rpm, respectivamente. El modelo seleccionado es marca SEW Eruodrive, modelo Movitrac B OS de alimentación monofásica para motores de potencia comprendida entre 0,55 y 0,75 hp.

4.8.11. Selección del controlador.

Luego de la selección de la totalidad de los elementos primarios, transmisores, y elementos finales de control. Se puede observar, que en el sistema de control, existirán señales analógicas de 4-20mA y señales digitales de lazos de control on- off. Se necesita entonces de un sistema de adquisición de datos que permita enviar y recibir señales analógicas y digitales. Para lo cual se seleccionó el sistema de adquisición de datos de Advantech Active DAQ Pro, este tipo de controlador, ofrece ventajas que lo hacen elegible como controlador, algunas de estas se enumeran a continuación.

- Diseño modular, esto quiere decir que las entradas y salidas se encuentran en módulos, que se ensamblan en Racks de 4 y 8 ranuras, permitiendo agregar o eliminar módulos cuando se requiera.
- Software del controlador basado en ambiente Windows, fácil de usar. Que permite el control de las variables desde un computador servidor remoto, con una serie de comandos, a través de una red RS-485.
- Visualización en pantalla de la memoria usada, porcentaje de CPU utilizado además de valores de variables, constantes, etc.
- Permite cambios de configuración mientras se efectúa el proceso sin afectar el control del mismo.
- Generación de documentación y reportes.

- Excelente control para lazos PID (Proporcional Derivativo e Integrativo), además del manejo de señales analógicas sin comprometer su desempeño lógico.
- Monitoreo de alarmas y eventos.
- Hasta 180 puntos de entrada/salida remotos por cada rack de 8 de módulos.
- Alimentación eléctrica entre 10 y 30 VDC.
- Permite la determinación remota de fallos, y su ubicación.
- Posee un sistema electrónico que evita las perturbaciones eléctricas introducidas por conexiones a tierra, fuentes de poder, además que protege al sistema de sobre voltajes, y picos de corrientes peligrosas
- El sistema es capaz de mantener configuraciones del sistema y calibración en caso de fallas eléctricas.
- Posee un procesador con una resolución de datos de 16 bits.
- Consumo de energía de 4 W máximo, lo que denota un consumo de energía eléctrica bastante bajo.
- Cables de comunicación RS-485 son apantallados, lo que reduce la absorción de ruido eléctrico.
- Las redes de comunicación RS-485 pueden extenderse hasta por 1200 metros, y pueden estar formadas hasta por 32 nodos, o racks de 8 módulos cada uno.

Tabla 4.32 Cantidad y tipos de señales a manejar por el sistema de adquisición de datos.

Tipo de señal	Entradas	Salidas
Analógicas (4-20)mA	10	6
Digitales (contacto seco)	4	9

Luego se seleccionaron los módulos de entradas y salidas analógicas Adam-5017 que poseen una resolución efectiva de 12 bits, toman 10 muestras por segundo y tienen una precisión de 0,1%. Se necesitan 2 módulos de entradas, y 1 de salidas.

Luego se seleccionaron los módulos para las entradas y salidas digitales Adam-5055s, por permitir la conexión en “seco”, de los instrumentos, es decir, sin requerir fuentes externas de energía, este modulo tiene 8 entradas digitales a contacto seco, y 8 salidas digitales. Y un módulo adicional sólo para salidas digitales del modelo Adam-5052.

4.8.12. Ingeniería de detalles.

Se seleccionaron instrumentos y equipos disponibles en el mercado nacional, por medio de proveedores locales. Luego se procedió a hacer el llenado de las hojas de especificaciones ISA para los instrumentos seleccionados, estas hojas de especificaciones se muestran en los anexos número 7, numeradas del 1 al 17. Cabe destacar que se crearon hojas de especificaciones para instrumentos que no están contemplados por la norma (ISA -20- 1981), se tomaron hojas especificaciones afines y se las modificó para presentar la información necesaria. Cada hoja corresponde a uno de los instrumentos mostrados en el diagrama de tuberías e instrumentación y los diagramas de lazo, por lo tanto existe una correspondencia entre las etiquetas o “tag” de cada instrumento.

Los instrumentos seleccionados y sus similares comerciales se pueden observar en el anexo número 8. Cada instrumento fue seleccionado de acuerdo a su aplicación, guardando una estrecha relación con el diagrama de tuberías e instrumentación.

El diseño del tablero y de las regletas, se hizo utilizando las distancias y esquemas de montaje recomendadas por los fabricantes de los equipos, con asesoría técnica de SAIN, C.A. Estos diseños se muestran en los anexos numero 9.

El layout de canalizaciones eléctricas y neumáticas se hizo también bajo asesoría de SAIN, C.A. Tomando en cuenta las distancias recomendadas entre canalización

de cables de señales y cables de potencia, los tipos de conexiones, y la cantidad de 8 máximo cables por conducto. Este layout, se puede observar en el anexo número 10.

El listado de cables se realizó utilizando los manuales de cada uno de los instrumentos, para determinar los calibres de cable a utilizar según la numeración AWG. Este listado, se puede observar en el anexo numero 11 y l guarda una estrecha relación con los diagrama de lazo presentados en los anexos numero 6, del 2 al 10.

4.9. ANÁLISIS DE COSTOS.

Para el siguiente análisis se comparará costo de este proyecto que se denominará Alternativa de inversión A, en comparación con la compra de sistemas similares existentes en el mercado. Cabe destacar que estos sistemas, son desarrollados por empresas extranjeras, que operan en el país y ofrecen entre sus productos equipos didácticos para el estudio de sistemas de medición y control. Entre estas opciones se destacan el banco de ensayos Gunt Hamburg, modelo RT-582, y la estación PCS compact de Festo. Estas alternativas de inversión se denominarán como Alternativas de inversión B y C respectivamente.

4.9.1. Alternativa de inversión A, (Sistema diseñado).

Para establecer de manera aproximada, cuál sería la inversión que debería hacerse para la construcción del proyecto, se verificaron precios de materiales y equipos disponibles en el mercado nacional. Estos precios se muestran en la tabla 4.33, cabe destacar que en algunos de los casos, los precios se obtuvieron mediante cotizaciones que se pueden observar en los anexos número 12, otros precios fueron obtenidos mediante cotización telefónica (en la tabla marcados con 1 asterisco), y otros aparecen publicados en las páginas de Internet de los proveedores (en la tabla marcados con 2 asteriscos).

CAPÍTULO IV – DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA PLANTEADO

Tabla 4.33 Precio de equipos y materiales.

Artículo	Marca y Modelo	Precio unitario (Bs. F.)	Cantidad	Precio Total (Bs. F.)
Bomba centrífuga	Mardal MAX-75	986,45	1	986,45
Tubo de PVC	Tubrica 1/2" Espiga de 6 m	42,34	2	84,68
Tubo de PVC	Tubrica 1" Espiga de 3 m	36,96	1	36,96
Tubo de PVC	Tubrica 1 1/4 " Espiga de 6 m	96,88	1	96,88
Tubo de PVC	Tubrica 1 1/2 " Espiga de 6 m	126,22	1	126,22
Codo de PVC	Tubrica 1 1/2 "	6,44	1	6,44
Buje soldado de PVC	Tubrica 1 1/2" x 1 1/4"	1,44	1	1,44
Adaptador Hembra (T3)	Tubrica 1 1/2 " (soldado)	4,37	1	4,37
Adaptador Hembra (T2)	Tubrica 1/2" Rosca NPT	1,20	3	3,60
Adaptador Hembra (T2)	Tubrica 3/4" Rosca NPT	6,33	1	6,33
Codo de PVC	Tubrica 1"	2,30	1	2,30
Válvula check de acero(*)	Scha 40 1" Rosca NPT	70,98	1	70,98
Válvula de compuerta de acero (*)	Sch 40 1" Rosca NPT	119,98	1	119,98
Adaptador macho	Tubrica 1" Rosca NPT	1,74	4	6,96
Reducción en linea de PVC	Tubrica (Soldada) 1" x 1/2"	1,56	1	1,56
Tee de PVC	Tubrica (Soldada) 1/2"	1,12	1	1,12
Tee de PVC	Tubrica (Rosca NPT) 1/2"	1,12	4	4,48

CAPÍTULO IV – DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA PLANTEADO

Tabla 4.33 Precio de equipos y materiales. (Continuación)

Artículo	Marca y Modelo	Precio unitario (Bs. F.)	Cantidad	Precio Total (Bs. F.)
Codo de PVC	Tubrica 1/2" Rosca NPT	0,98	8	7,84
Valvulas de bola de PVC	Tubrica 1/2" Rosca NPT	17,70	4	70,80
Válvula check de acero (*)	Sch 40 1/2" Rosca NPT	47,98	1	47,98
Adaptador macho	Tubrica 1/2" Rosca NPT	0,63	3	1,89
Pegamento para tuberías de PVC	Tubrica 1/4 galon	22,49	2	44,98
Pegamento para tuberías de PVC	Tubrica Agua caliente 1/8 galon	40,49	1	40,49
Láminas de acrílico (*)	Acriplus 2440x1220x5mm	225,63	8	1.805,04
Láminas de acrílico (*)	Acriplus 2440x1220x8mm	285,70	1	285,70
Fabricación de tanque 3	Monindu, C.A.	3850,00	1	3.850,00
Fabricación de estructura	Monindu, C.A.	1980,00	1	1.980,00
Sonda capacitiva	ASI Long	4492,00	1	4.492,00
Transmisor de presion diferencia	Honeywell	6500,00	2	13.000,00
RTD PT-100	Honeywell	250,00	1	250,00
Termocupla tipo J	Honeywell	225,00	1	225,00
Transmisor de temperatura	Honeywell	599,00	2	1.198,00
Interruptor de nivel	ASI Long	670,00	1	670,00

CAPÍTULO IV – DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA PLANTEADO

Tabla 4.33 Precio de equipos y materiales. (Continuación)

Artículo	Marca y Modelo	Precio unitario (Bs. F.)	Cantidad	Precio Total (Bs. F.)
Manometro indicador de presión	Ashcroft	250,00	3	750,00
Convertidor I/P		672,00	1	672,00
Valvula de control con actuador		4635,00	1	4.635,00
Controlador de corriente	SCR Power controller Omega	2118,00	1	2.118,00
Sistema de adquisicion de datos	Advantech Adam	6000,00	1	6.000,00
Válvula de seguridad (*)	Presión 100 psi, acero fundido, Rosca 1/2" NPT	365,00	1	365,00
Variador de Frecuencia	Sew Eurodrive Movitrac B	7800,00	1	7.800,00
Resistencia calefactora.	Hecha a medida Rosca 3/4 NPT 1000W	175,00	1	175,00
Unidad de mantenimiento de aire	BIT Fil+Reg	408,41	2	816,82
Presostato	Conexión 1/8"	170,44	1	170,44
Electroválvula	Conexión 1/8"	159,04	1	159,04
Manguera neumática	Para conexiones de 1/8"	6,42	10	64,20
Racores pasamuros	Conexión 1/8"	19381,00	3	58.143,00
Racores rectos automaticos	Conexión 1/8"	8,27	6	49,62
Tablero de control	1,2x0,8x0,3	321,00	1	321,00

Tabla 4.33 Precios de equipos y materiales. Coninuación.

Artículo	Marca y Modelo	Precio unitario (Bs. F.)	Cantidad	Precio Total (Bs. F.)
Conjunto de Placa orificio	Instrumatik	4785,00	1	4.785,00
Subtotal Bs. F.				116.554,59
IVA (12%)				13.986,55
Total Bs. F.				130.541,14

A estos costos debe sumarse el costo de instalación, mano de obra y puesta a punto del sistema de control que es un total de 42.840,00 Bs. F.

El costo total de la implementación de éste proyecto es de 173.381,14 Bs. F.

4.9.2. Alternativa de inversión B (Equipo Gunt Hamburg).

De este equipo se tiene una solicitud de cotiación realizada en el año 2007, para lo cual se le aplicará el IPC, que es el es el indicador que más satisfactoriamente se aproxima a la estimación del fenómeno inflacionario, en comparación con otros indicadores similares [2].

En la tabla 4.34 se puede observar el monto total de la inversión para el año 2007.

Tabla 4.34 Monto de la opción de inversión B para el año 2007

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
RT-580 Sistema Industrial para control de Procesos y mando Labelling	1	281.629,13	281.629,13
RT-582.20 Software para adquisición de datos por PC	1	3.893,44	3.893,44
RT-650.12 Tarjeta PC-Interface	2	11.399,95	22.799,9
Total			308.322,47

CAPÍTULO IV – DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA PLANTEADO

En la tabla 4.35 se presentan los índices de precios al consumidor IPC proporcionados por el Banco central de Venezuela [2]. Y el porcentaje de variación es el valor de de la inflación.

Tabla 4.35 Índices de precios al consumidor año 2007, 2008 y 2009[2].

Mes y año	Índice	Variación (%)
Abril -2009	139,7	1,8
Marzo -2009	137,2	1,2
Febrero -2009	135,6	1,3
Enero -2009	133,9	2,3
Variación acumulada		6,6
Diciembre -2008	130,9	2,6
Noviembre -2008	127,6	2,3
Octubre -2008	124,7	2,4
Septiembre -2008	121,8	2,0
Agosto -2008	119,4	1,8
Julio -2008	117,3	1,9
Junio -2008	115,1	2,4
Mayo -2008	112,4	3,2
Abril -2008	108,9	1,7
Marzo -2008	107,1	1,7
Febrero -2008	105,3	2,1
Enero -2008	103,1	3,1
Variación acumulada		27,2
Diciembre -2007 (Base)	100,0	

Luego se utiliza la ecuación 4.27 para determinar el precio actual de estos equipos. Donde i_i es el porcentaje de inflación anual, n es la cantidad de años para los cuales se estima la tasa de inflación.

$$\text{Precio}_i = \text{Precio}_{i-1} \cdot (1 + i_i)^n \quad (4.27)$$

$$\text{Precio}_{2008} = \text{Precio}_{2007} \cdot (1 + i_{2008})^1 = 30.8322,47(1 + 0,272) = 392.186,18\text{Bs.F.}$$

CAPÍTULO IV – DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA PLANTEADO

$$\text{Precio}_{2009} = \text{Precio}_{2008} \cdot (1 + i_{2009})^1 = 392.186,18(1 + 0,066) = 418.070,46 \text{Bs.F.}$$

Se obtuvo un precio estimado de 418.070,46Bs.F. que es 72,12% mayor al costo de la alternativa A.

4.9.3. Alternativa de inversión C.

El precio de este equipo se tiene de una solicitud de cotización reciente, a la cual debe sumarse el IVA, el costo del software y los cables de programación que se venden por separado, y no requiere de ningún cálculo profundo para la determinación del costo. Estos costos se muestran en la tabla 4.36.

Tabla 4.36 Costos totales de la opción C

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Control de procesos compacto	1	130.237,00	130.237,00
Cables de programación.	1	1142,65	1142,65
Software FST original	1	1952,70	1952,70
		Subtotal	133.422,35
		IVA (12%)	16.010,68
		Total	149.433,05

4.9.4. Decisión de inversión.

A continuación en la tabla 4.37 se presenta la comparación entre las dos alternativas de inversión

Tabla 4.37 Comparación económica entre las dos alternativas.

	Alternativa A (Diseño)	Alternativa B (Gunt Hamburg)	Alterativa C (Festo)
Valor Actual (BsF)	173.381,14	418.070,46	149.433,03

Estos costos de inversión son valores actuales, es por ello que se puede notar una gran ventaja en implementar el diseño presentado en este trabajo de investigación (alternativa A), y se consigue un ahorro de 58,52% respecto a la compra de un sistema similar como el de Gunt Hamburg (alternativa B).

Al comparar los costos de inversión de la alternativa A y la alternativa C, se pudo determinar que se consigue un ahorro del 13,81% si se invierte en la alternativa C.

La alternativa C ofrece las mismas características funcionales del sistema diseñado, pero incluye una variedad diferente de equipos de medición y control, posee dos válvulas de control, sensores ultrasónicos, sensores capacitivos, interruptores flotadores, sensor de caudal, sensor de presión y una RTD. La tecnología del controlador es de lógica programable o PLC, y es una unidad móvil, menos robusta que el diseño planteado. Esta información ha sido proporcionada por la compañía Festo, C.A., aunque no ofrece demasiados detalles técnicos es suficiente para realizar un análisis cualitativo entre ambas alternativas.

La opción A ofrece una mayor cantidad y por lo tanto mayor diversidad de instrumentos de medición, transmisores, y elementos finales de control, en comparación con lo que ofrece la alternativa C, lo que evidentemente la hace más costosa. Además la alternativa A fue diseñada específicamente para satisfacer las necesidades existentes en el LCAU, lo que influye enormemente en la cantidad, calidad y diversidad de instrumentos.

La alternativa A ofrece la posibilidad de implementarse por fases, es decir, que puede ser implementada por partes de acuerdo al presupuesto que se tenga disponible, y por ser un diseño propio puede adaptarse a medida de que los recursos se encuentren disponibles, esto representa otra ventaja sobre la alternativa C, ya que el

financiamiento bien podría ser otorgado por el total del costo del proyecto, o por una fracción.

Sin embargo la alternativa C supera a la alternativa A respecto al tiempo que toma en ponerse en marcha, pero no es suficiente para tomar una decisión a favor de esta alternativa debido a las demás ventajas de la alternativa A sobre la alternativa C expresadas anteriormente.

Por lo tanto la alternativa de inversión seleccionada es la A, a pesar de que es muy similar a un equipo ya existente, ofrecido por una compañía respetable y de amplia trayectoria, ofrece más ventajas técnicas y flexibilidad al momento del financiamiento.

CAPÍTULO V

5.1. CONCLUSIONES.

- Se determinaron las características del laboratorio de Instrumentación en función a los objetivos contemplados en la asignatura y se identificaron las necesidades existentes. Esto se logró mediante el análisis del programa sinóptico de la asignatura Instrumentación Industrial correspondiente al sexto semestre de Ingeniería Mecánica, y de las actividades de laboratorio, luego mediante un proceso de observación se logró determinar las carencias, y necesidades del laboratorio de Instrumentación Industrial.
- Se Realizó el diseño de una planta piloto constituida por 3 tanques con funciones y finalidades diferentes entre si, y una red de flujo con una bomba centrífuga, donde el fluido de trabajo es agua, lo que permitirá realizar la medición de temperatura, presión, caudal y nivel, en diferentes puntos del sistema. También se realizó el diseño de la estructura de soporte de los tanques, y demás dispositivos del sistema utilizando para el análisis de esfuerzos el método de los elementos finitos.
- Se realizó el diseño del sistema de medición y control remoto de las variables del sistema. Las variables son temperatura, presión, flujo, y nivel, permitiendo la integración de distintos esquemas de control como son el control directo, control on–off, control en cascada. Además, se hizo la selección de instrumentos de medición y control compatibles con un sistema de adquisición de datos (SAD), que permiten satisfacer en gran medida las necesidades presentes en el laboratorio.

- Se desarrollaron, planos de las vistas principales, de detalles, e isométricos, esquemas, y cómputos métricos de materiales necesarios, que permitirán la construcción de la planta piloto y la implementación del sistema de medición y control diseñado.
- Se realizó un análisis de costos utilizando cotizaciones de los equipos y materiales de construcción para determinar los costos aproximados de la implementación del sistema diseñado, siendo éstos de 173.381,14 Bs. F. Posteriormente se comparó con los precios de dos sistemas similares, ofrecidos por empresas extranjeras que operan en el país, para lo que se determinó un ahorro del 58,52% con respecto a la segunda alternativa de inversión, y se determinó que a pesar de significar un costo 13,81% mayor la tercera alternativa, ofrece más ventajas técnicas y es más flexible de acuerdo al financiamiento. Se determinó que la mejor opción de inversión es la implementación del diseño propuesto en esta tesis.

5.2. RECOMENDACIONES

Desarrollar un plan de mantenimiento preventivo, que permita alcanzar la mayor vida útil del sistema diseñado, y reducir los costos generados por el mantenimiento.

Recubrir las partes de acero como la estructura y el tanque 1 (presurizado), con fondos anticorrosivos, y pinturas de acabado, que permitan la preservación del buen estado de las mismas.

Contratar personal especializado para la instalación de los instrumentos de medición y control, ya que esto disminuiría el riesgo de anulaciones de garantías, por conexiones eléctricas y electrónicas mal hechas, manipulación indebida de dispositivos muy sensibles, apriete excesivo de tornillos, entre otros.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALJIBES, Pascual y PAREDES, Arnaldo. (1993). *Rediseño e ingeniería de detalles de los simuladores de procesos para el laboratorio de Control*. Trabajo de grado no publicado. Universidad de Carabobo, Bárbula.
2. BANCO CENTRAL DE VENEZUELA, (2009) *Portal oficial informativo*. <http://www.bcv.org.ve/>
3. CRANE. (1992). *Flujo de fluidos en válvulas accesorios y tuberías*. División de Ingeniería de Crane. México. Editorial McGraw-Hill.
4. CREUS, Antonio (1998). *Instrumentación Industrial*. (6ª ed.). México D.F.: Alfaomega grupo editor, S.A y C.V.
5. GHINI, Gabriele. (1999). *Diseño de una unidad para el estudio de cuatro variables principales de medición y control a lazo abierto y cerrado*. Universidad de Carabobo, Bárbula.
6. Hydraulic Institute, *Hydraulic Institute pipe friction manual*
7. LAYA, Armando. (1995). *Notas de manejo de fluidos*. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad de Carabobo.
8. MATAIX, Claudio. (1986). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Madrid: Ediciones del castillo S.A.
9. MATWEB, “*Your Source for Materials Information*”, [Datos en línea]. Disponible: <http://www.matweb.com/>.
10. MEGYESY, Eugene. (1992) *Manual de recipientes a presión. Diseño y cálculo*. México D.F.: Editorial Limusa S.A. de C.V.
11. MURILLO, William. (2004). *La investigación científica*. Publicado en Internet: <http://www.monografias.com/trabajos15/invest-cientifica/invest-cientifica.shtml>
12. NORTON, Robert L. (1999) “*Diseño de máquinas*” (1ª ed.). Editorial PrenticeHall – Pearson, México.



13. OMEGA. (1998). *Transactions in measurement and control Vol. 2:Data Acquisition*. [HTTP://WWW.OMEGA.COM](http://www.omega.com).
14. OMEGA. (1998). *Transactions in measurement and control Vol. 4:Flow and level measurement*. [HTTP://WWW.OMEGA.COM](http://www.omega.com).
15. RODRIGUEZ, Carlos. (1980) *Diseño de recipientes a presión por construcción soldada*, Trabajo de ascenso no publicado. Universidad de Carabobo, Bárbula.
16. SAN ANTONIO, Thalía D. “Análisis, simulación y caracterización tridimensional de prótesis de rodilla” Julio 2002.
17. VILCHEZ, Nelson. (2005) *Estrategias creativas en el diseño mecánico*. Universidad de Carabobo, Bárbula.
18. SHAMES, Irving. (1995) *Mecánica de Fluidos*. (3ª ed.). Santa Fe de Bogotá: McGraw-Hill, Inc.

**APÉNDICE 1: DIMENSIONAMIENTO DE LA VÁLVULA DE CONTROL.**

Para la selección de la válvula reguladora adecuada, es necesario calcular el coeficiente de caudal (C_v) de la válvula. Usando la ecuación I.

$$C_v = \frac{q}{N_1 \cdot F_p \cdot F_R \cdot \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{G_f}}} \quad \text{XXVIII}$$

Donde:

q = caudal 0,54m³/h

N_1 = 0,0865 (m³/h-kPa)

F_p = factor de geometría de la tubería (No hay accesorios antes o después de la válvula se asume 1)

F_R = factor de numero de Reynolds (Se asume 1)

C_v = coeficiente de caudal de la válvula.

ΔP_{valv} = $P_1 - P_2$ caída de presión en la válvula

G_f = gravedad específica del agua 0,996

$$\Delta P_{valv} = 30\% \cdot \Delta P_{sistema} \quad \text{II}$$

Se conoce que:

$$\Delta P_{sistema} = \Delta P_{válv} + \Delta P_{línea} \quad \text{III}$$

Donde $\Delta P_{línea}$ representa las pérdidas de disponibilidad en la red de flujo a causa de tuberías y equipos. Esta red está conformada por 5,36m de tubería de PVC de 1/2 pulgada, 1,73m de tubería de acero de 1 pulgada, una válvula de globo manual de 1/2 pulgada de diametro nominal, una placa orificio de β 0,5, y 0,96m de tubería de PVC de 1 y 1/4 de diametro.



Las pérdidas de disponibilidad para éste sistema se obtuvieron anteriormente, en el desarrollo del Capítulo IV durante el diseño del sistema hidráulico.

$$h_{f\text{ línea}} = 10,39\text{mca}$$

Que al multiplicarlo por el peso específico del agua ($9,79\text{kN/m}^3$), se obtiene

$$\Delta P_{\text{línea}} = 101,79\text{kPa}$$

$$\Delta P_{\text{sistema}} = \Delta P_{\text{válv}} + \Delta P_{\text{línea}} = 0,2685 \cdot \Delta P_{\text{sistema}} + \Delta P_{\text{línea}}$$

$$\Delta P_{\text{sistema}} = 0,2685 \cdot \Delta P_{\text{sistema}} + 101,79\text{kPa}$$

$$\Delta P_{\text{sistema}} = 101,79\text{kPa} / 0,7$$

$$\Delta P_{\text{sistema}} = 145,41\text{kPa}$$

$$\Delta P_{\text{válv}} = 0,3 \cdot (145,41) \text{kPa} = 43,62\text{kPa}$$

Adicionalmente, se tomó un factor de seguridad para el caudal máximo de la válvula, establecido en un 15% del mismo.

Sustituyendo los valores en la ecuación I

$$C_v = \frac{0,621}{0,0865 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{43,62}{0,996}}} = 1,084$$

Se procede a realizar el cálculo del número de Reynolds mediante la siguiente expresión

$$\text{Re}_v = \frac{N_4 \cdot F \cdot q}{v \sqrt{F_L \cdot C_v}} \left(\frac{F_L^2 \cdot C_v^2}{N_2 d^4} + 1 \right)^{1/4} \quad \text{IV}$$



$$Q = 0,621 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$C_v = 1,084$$

Fd=1 (asiento de válvula de globo)

$$d = 1/2'' = 12,7 \text{ mm}$$

Fp = 1 (d iguales aguas arriba y aguas abajo de la válvula)

$$F_l = 0,9$$

$$\nu = 0,803 \text{ cSt}$$

$$N_2 = 0,00214$$

$$N_4 = 76000$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación IV se obtiene:

$$Re_v = \frac{76000 \cdot 0,621}{0,803 \sqrt{0,9 \cdot 1 \cdot 1,172}} \left(\frac{1^2 \cdot 1,084^2}{0,00214 \cdot 12,7^4} + 1 \right)^{1/4} = 57330,65$$

Como el número de Reynolds es mayor a 40000, el factor de número de Reynolds es 1, y no es necesario recalcular el C_v de la válvula.

Se seleccionó una válvula de globo de 1/2 pulgada de diámetro marca Honeywell de dos vías, con conexiones roscadas 1/2 NPT, modelo V5011N, de accionamiento neumático, trim de 20mm y un C_v máximo de 1,16.



ANEXOS



ANEXO 1

Estos anexos corresponden a los planos del tanque número 1.

- Plano de vistas ortogonales, y detalle del soporte.



ANEXO 2

Estos anexos corresponden a los planos del tanque número 2.

- Plano de vistas ortogonales.
- Plano de vista isométrica.



ANEXO 3

Estos anexos corresponden a los planos del tanque número 3.

- Plano de vistas ortogonales y vista isométrica.



ANEXO 4

Estos anexos corresponden a los planos de la red de flujo.

- Plano de vistas ortogonales
- Plano de vista isométrica.



ANEXO 5

Estos anexos corresponden a los planos de la estructura.

- Plano de vista isométrica de la estructura.
- Plano de vistas ortogonales de la estructura.
- Plano de soporte para el tanque 1.
- Plano de soporte para el tanque 2.
- Plano de soporte para el tanque 3.
- Plano de soporte para los tanques 1 y 2.
- Plano de la columna del soporte de los tanques 1 y 2.
- Plano de la viga principal del soporte de los tanques 1 y 2.



ANEXO 6

Estos anexos corresponden al diagrama de instrumentación y tuberías y los diagramas de lazo.

- Diagrama de instrumentación y tubería.
- Diagrama de lazo de nivel 101 (señales analógicas).
- Diagrama de lazo de nivel 101 (señales digitales).
- Diagrama de lazo de presión 101.
- Diagrama de lazo de temperatura 1-102.
- Diagrama de lazo de temperatura 2-102.
- Diagrama de lazo de nivel 102.
- Diagrama de lazo de nivel 103.
- Diagrama de lazo de flujo 104 (señales analógicas).
- Diagrama de lazo de flujo 104 (señales digitales).



ANEXO 7

Estos anexos corresponden a las hojas ISA de especificación de instrumentos.

- Hoja de especificaciones del sistema de adquisición de datos.
- Hoja de especificaciones de la válvula de control.
- Hoja de especificaciones de la válvula solenoide
- Hoja de especificaciones del variador de frecuencia.
- Hoja de especificaciones de la resistencia de calentamiento y controlador de potencia.
- Hoja de especificaciones de transmisor de temperatura para RTD.
- Hoja de especificaciones de transmisor de temperatura para T/C.
- Hoja de especificaciones de transmisor de nivel capacitivo.
- Hoja de especificaciones de transmisor de presión diferencial (nivel).
- Hoja de especificaciones de transmisor de presión diferencial (flujo).
- Hoja de especificaciones de la placa orificio.
- Hoja de especificaciones del interruptor de nivel (flotador).
- Hoja de especificaciones de RTD.
- Hoja de especificaciones de termocupla.



ANEXO 8

Estos anexos corresponden al listado de las marcas y los modelos de los instrumentos seleccionados y sus similares, con sus proveedores.

- Listado de instrumentos seleccionados.
- Listado de instrumentos similares.



ANEXO 9

Estos anexos corresponden al diseño del tablero, y las regletas de conexiones.

- Plano de distribución del tablero.
- Diseño de las regletas.



ANEXO 10

Estos anexos corresponden al Layout de canalizaciones eléctricas y neumáticas.

- Plano de distribución de canalizaciones eléctricas y neumáticas.



ANEXO 11

Estos anexos corresponden al listado de cables, (de acuerdo al instrumento se especifica el calibre, la longitud, y la etiqueta que lo identifica respecto al diagrama de lazo correspondiente).

- Listado de cables.



ANEXO 12

Estos anexos corresponden a las cotizaciones de algunos de los equipos, y materiales enumerados en la lista de costos.

- Cotización Bomba centrífuga Mardal.
- Cotización Sistemas automáticos Industriales SAIN, C.A.
- Listado de precios Tubrica (publicado en la pagina web)
- Cotización neumática Rotonda C.A.
- Cotización Ry B Suministros Industriales, C.A.
- Cotización Gunt Hamburg.
- Cotización Festo C.A.