

REDISEÑO DEL SISTEMA DE TANQUES EN CASCADA UBICADO  
EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

DANIEL ALBERTO JARAMILLO OSORIO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Directora

Norha Ligia Posada Restrepo

Ingeniera en Instrumentación y Control

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLÍN  
2014

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Firma  
Nombre  
Presidente del jurado

---

Firma  
Nombre  
Jurado

---

Firma  
Nombre  
Jurado

Medellin, Febrero 2014

## **DEDICATORIA**

Quiero agradecer a mis padres: Dora P. Osorio y Francisco A. Jaramillo, además a Maria Paulina Franco García quienes fueron un gran apoyo durante toda mi carrera, ya que sin ellos seguramente no estaría en este punto tan importante de mi vida. MUCHAS GRACIAS.

## **AGRADECIMIENTOS**

Ing. Norha Posada, por la asesoría y apoyo incondicional y paciencia infinita en el desarrollo de este trabajo.

A cada uno de los proveedores que brindaron información oportuna necesaria para culminar este proyecto.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. MARCO TEÓRICO	18
1.1. SISTEMA DE TANQUES EN CASCADA	18
1.2. PRINCIPIOS DE INSTRUMENTACIÓN	20
1.3. SISTEMAS DE CONTROL	22
1.4. DISEÑO MECÁNICO	23
1.4.1. Pérdidas en tubería simple	24
1.4.1.1. Pérdidas menores o secundarias	24
1.4.2. Bombas	26
1.4.2.1. Bombas dinámicas	26
1.4.2.2. Bombas de desplazamiento positivo	27
1.4.3. Mecánica de materiales	27
1.4.3.1. Esfuerzos	27
1.4.3.2. Esfuerzo último y esfuerzo admisible	28
1.4.3.3. Consideraciones de diseño	29
2. DISEÑO PRELIMINAR	30
2.1. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	30
2.1.1. Estado del arte	30
2.1.1.1. Universidad EAFIT	31
2.1.1.2. Universidad Pontificia Bolivariana	31
2.1.2. Antecedentes	32
2.1.3. Tanques (Condición actual)	37
2.2. OPORTUNIDADES DE MEJORA	37

2.2.1. Inconvenientes del sistema	38
2.3. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	39
2.3.1. Selección de la estrategia de control	40
2.3.1.1. Propuesta de control A	40
2.3.1.2. Propuesta de control B	40
2.3.1.3. Propuesta de control C	40
2.3.1.4. Selección de la propuesta más adecuada	44
2.3.2. Selección de la instrumentación (Principios de operación)	44
2.3.2.1. Medidor de flujo	45
2.3.2.2. Válvula de control	46
2.3.2.3. Bomba	46
2.4. DISEÑO MECÁNICO PRELIMINAR	47
2.4.1. Tanques	47
2.4.1.1. Configuración	49
2.4.1.1.1. Método de la convergencia controlada	50
2.4.1.1.2. Resultados	51
2.4.2. Estructura	54
2.4.2.1. Análisis de carga	54
2.4.3. Red de tuberías	56
2.4.3.1. Aforo sistema actual	58
3. DISEÑO BÁSICO	59
3.1. INSTRUMENTACION	59
3.1.1. Proveedores	59
3.1.2. Cotizaciones	61
3.1.3. Selección de la instrumentación	62
3.1.3.1. Válvula	62
3.1.3.2. Transmisor	63

3.1.3.3. Convertidor P/I	63
3.1.3.4. Regulador de presión	64
3.1.3.5. PLC	64
3.1.3.6. Medidor de flujo	65
3.1.3.7. Bomba más variador de velocidad	66
3.1.3.8. Fuente	66
3.1.3.9. Manómetros	66
3.2. DISEÑO MECÁNICO BÁSICO	68
3.2.1. Red de tuberías	68
3.2.2. Tanques	71
3.2.3. Estructura	73
3.2.4.1. Estructuras	75
3.2.4.2. Tanques	76
3.2.4.3. Piezas complementarias	76
4. DISEÑO DE DETALLE	78
4.1. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA	78
4.2. INSTRUMENTACIÓN	80
4.2.1. Instrumentación seleccionada	80
4.2.2. Conexiones eléctricas	81
4.3. MONTAJE, ESTRUCTURA Y TANQUES	82
4.4. PROPUESTAS DE REDISEÑO	83
4.4.1. Estrategia 1	84
4.4.2. Estrategia 2	84
4.5. RECOMENDACIONES	85
5. CONCLUSIONES	87
BIBLIOGRAFIA	89
ANEXOS	91

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de tanques en cascada de la UPB	19
Figura 2. Diagrama simplificado de tubería e instrumentación del sistema de tanques en cascada	19
Figura 3. Sistema de control en lazo abierto	22
Figura 4. Sistema de control en lazo cerrado	23
Figura 5. Clasificación de las bombas dinámicas	26
Figura 6. Sistema de tanques del Laboratorio de Electrónica de la UPB	32
Figura 7. Válvula de control Kieley & Mueller, modelo 1056 equipada con un convertidor/posicionador Honeywell EP2301	33
Figura 8. Transmisor de nivel Fischer & Porter, modelo 50LP 3111BA	33
Figura 9. Convertidor P/I Foxboro, modelo 892-2-Y	34
Figura 10. Controlador Foxboro, modelo 762CNA	34
Figura 11. Regulador de presión Kieley & Mueller, modelo 467	35
Figura 12. Rotámetro Fisher & Porter	35
Figura 13. Indicador de vidrio, el sistema cuenta con dos de estos elementos, uno para cada tanque	36
Figura 14. Vertederos que están ubicados en el Tk1	36
Figura 15. Moto bomba	37
Figura 16. Propuesta A	41
Figura 17. Propuesta B	42
Figura 18. Propuesta C	43



Figura 19. Estado de esfuerzos Tk1	48
Figura 20. Estado de esfuerzos Tk2	49
Figura 21. Mapa de propiedades	51
Figura 22. PMMA, simulación de carga Tk1	53
Figura 23. PMMA, simulación de carga Tk2	53
Figura 24. Estado de esfuerzos estructura Tk1 inicial	54
Figura 25. Estado de esfuerzos estructura Tk2 inicial	55
Figura 26. Estado de esfuerzos estructura Tk1 final	55
Figura 27. Estado de esfuerzos estructura Tk2 final	56
Figura 28. Sistema actual (Medidas en centímetros)	57
Figura 29. Sistema nuevo (Medidas en centímetros)	57
Figura 30. Valores de simulación red de tuberías (Bomba)	68
Figura 31. Resultados generales red de tuberías	69
Figura 32. Resultados nuevo sistema de red de tuberías	70
Figura 33. Prueba de esfuerzos al canal del Tk1	72
Figura 34. Tk1 rediseñado	72
Figura 35. Tk2 rediseñado	73
Figura 36. Estructura Tk1	74
Figura 37. Estructura Tk2	74
Figura 38. Acople tanque-medidor de presión	77
Figura 39. Esquema final del sistema	79
Figura 40. Balance de energía para dos puntos de un fluido	95
Figura 41. Diagrama de <i>Moody</i>	99

Figura 42. Esfuerzo normal	100
Figura 43. Esfuerzo cortante	101
Figura 44. Composición CD de anexos	108

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Instrumentación actual del sistema de tanques	32
Tabla 2. Componentes con problemas de funcionamiento en el sistema de tanques en cascada	38
Tabla 3. Nueva instrumentación	39
Tabla 4. Selección de la propuesta de instrumentación	44
Tabla 5. Ponderación de los criterios de evaluación	45
Tabla 6. Tabla de selección de medidor de flujo	45
Tabla 7. Tabla de selección válvula de control	46
Tabla 8. Tabla de criterios de selección para el tipo de bomba	46
Tabla 9. Condiciones de trabajo actual del sistema de tanques	48
Tabla 10. Tabla método de la convergencia controlada	50
Tabla 11. Comparación final por el método de la convergencia controlada	52
Tabla 12. Cálculo de carga para cada estructura según el tanque que soportan	54
Tabla 13. Aforo sistema actual	58
Tabla 14. Proveedores	60
Tabla 15. Elementos cotizados	60
Tabla 16. Posibles proveedores	62
Tabla 17. Selección de instrumentación (Válvula)	63
Tabla 18. Selección de instrumentación (Transmisor)	63
Tabla 19. Selección de la instrumentación (Convertidor)	64

Tabla 20. Selección de la instrumentación (Regulador de presión)	64
Tabla 21. Selección de la instrumentación (PLC)	65
Tabla 22. Selección de la instrumentación (Medidor de flujo)	65
Tabla 23. Selección de la instrumentación (Bomba con variador de velocidad)	66
Tabla 24. Selección de instrumentación (Fuente)	66
Tabla 25. Selección de la instrumentación (Manómetro de 0-30 PSI)	67
Tabla 26. Selección de la instrumentación (Manómetro de 0-15 PSI)	67
Tabla 27. Cotización elementos mecánicos	75
Tabla 28. Cotización de estructura	75
Tabla 29. Cotización tanques	76
Tabla 30. Cotización acople tanque-medidor de presión	77
Tabla 31. Elementos del sistema de tanques	79
Tabla 32. Costo instrumentación seleccionada (Propuesta C)	80
Tabla 33. Costo del montaje	81
Tabla 34. Instrumentos reutilizables	81
Tabla 35. Costos de montaje e implementación del tablero de control	82
Tabla 36. listado de piezas para el montaje	83
Tabla 37. Propuesta 1 (Implementación)	84
Tabla 38. Propuesta 2 (instrumentación)	85
Tabla 39. Convertidor/posicionador	103
Tabla 40. Manómetro ubicado en la entrada de la válvula de control	104
Tabla 41. Manómetro ubicado a la salida de la válvula de control	104
Tabla 42. Manómetro de indicación para el regulador de presión	105

Tabla 43. Manómetro de indicación para el regulador de presión	105
Tabla 44. Especificaciones del rotámetro	105
Tabla 45. Regulador de presión	106
Tabla 46. Convertidor de P/I	106
Tabla 47. Transmisor de presión	107

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Pérdidas menores	25
Ecuación 2. Pérdidas menores (longitud equivalente)	25
Ecuación 3. Esfuerzo	27
Ecuación 4. Factor de seguridad	28
Ecuación 5. Presión hidrostática	47
Ecuación 6. Selección de instrumentación	62
Ecuación 7. Ecuación de <i>Bernoulli</i>	96
Ecuación 8. Número de Reynolds	96
Ecuación 9. Ecuación de <i>Darcy-Weisbach</i>	97
Ecuación 10. Esfuerzo cortante	101

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. ANTEPROYECTO	91
ANEXO B. ELEMENTOS TEÓRICOS COMPLEMENTARIOS	93
ANEXO C. MANUALES Y COTIZACIONES	108
ANEXO D. PLANOS	109
ANEXO E. DOCUMENTOS ADICIONALES	110

## **RESUMEN**

En este proyecto se elabora el rediseño del sistema de tanques en cascada ubicado en la Universidad Pontificia Bolivariana, en el laboratorio de Operaciones Unitarias, recomendando reemplazar los elementos que deben de ser sustituidos, sea por su antigüedad o porque ya no son funcionales y afectan el correcto funcionamiento del sistema. Además se proyecta agregar otros elementos para dar mayor versatilidad a las formas de control y monitoreo que se pueda realizar y así incrementar el nivel académico de las prácticas de pregrado y posgrado que allí se realizan. La Metodología utilizada para el desarrollo de este proyecto consiste en dos etapas, la primera etapa consiste en identificación y conocimiento del sistema e identificar las oportunidades de mejora; la segunda etapa agrupa la identificación de proveedores, selección de la instrumentación y presentación de las diferentes propuestas de rediseño.

**PALABRAS CLAVE: REDISEÑO DEL SISTEMA DE TANQUES EN CASCADA, SELECCIÓN DE INSTRUMENTACIÓN, FORMAS DE CONTROL, MONITOREO, PROPUESTAS DE REDISEÑO, IDENTIFICACIÓN DE PROVEEDORES.**



## INTRODUCCIÓN

Este proyecto contiene todo el rediseño del sistema de tanques en cascada ubicado en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad Pontificia Bolivariana. Éste inicia por la necesidad de mejorar las condiciones del sistema, ya que las prácticas de laboratorio realizadas se ven afectadas por algunos elementos que ya deben de ser reemplazados por los años de uso o por diferentes condiciones del equipo, que afectan los datos que en estas prácticas se toman. Además de lo anterior surge la necesidad de implementar diferentes tipos de estrategias de control tales como: control digital, inteligente, entre otros, que con los elementos actuales no es posible, debido a que éstos no poseen la suficiente tecnología para hacerlo. El trabajo inicia con la identificación del sistema actual, descripción de la instrumentación y de los elementos mecánicos que lo componen, luego se presenta toda la selección de la instrumentación y el diseño de los elementos mecánicos.

Es importante tener en la academia procesos que permitan al estudiante familiarizarse con procesos industriales y el sistema de tanques en cascada lo ha permitido, pero debido al tiempo de operación algunos de sus equipos ya no tienen el comportamiento esperado, por lo que se hace necesario reemplazar algunos de sus elementos y agregar otros para poder implementar estrategias de control mas versátiles y que tengan un mayor impacto en el estudiante.

## **1. MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se definen los antecedentes del proceso con el que se trabaja y los principales componentes teóricos a tener en cuenta en el rediseño de un proceso industrial, en el Anexo B se encuentra una extensión de los componentes teóricos utilizados. El trabajo se enfocó en el conocimiento del proceso, la selección de la instrumentación para la medición, el monitoreo y control del proceso y el rediseño de la parte mecánica.

### **1.1. SISTEMA DE TANQUES EN CASCADA**

El sistema de tanques en cascada a rediseñar se encuentra ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB). En la Figura 1, se presentan fotos de dicho sistema.

Figura 1. Sistema de tanques en cascada de la UPB

(a) Perfil izquierdo del sistema.

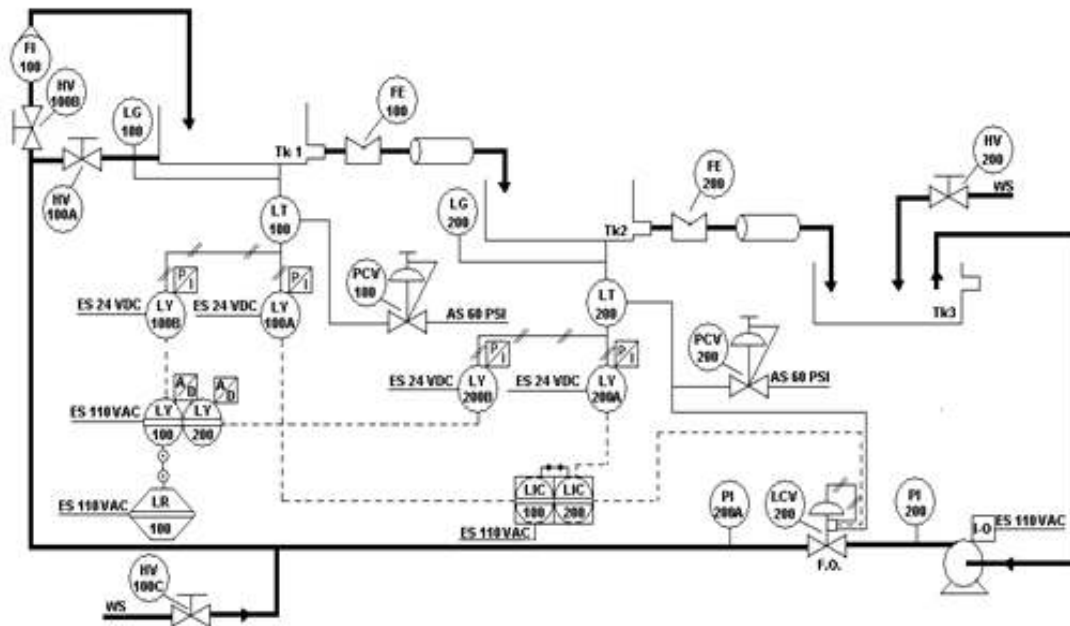


(b) Perfil derecho del sistema.



El diagrama simplificado de tuberías e instrumentación del sistema de tanques se observa en la Figura 2.

Figura 2. Diagrama simplificado de tubería e instrumentación<sup>1</sup> del sistema de tanques en cascada



Fuente: POSADA, Norha Ligia. Implementación de observadores en un sistema de tanques en cascada. Medellín: UPB, 2009. p.5.

<sup>1</sup>POSADA, Norha Ligia. Implementación de observadores en un sistema de tanques en cascada. Medellín: UPB, 2009. p.5.

El sistema recibe la alimentación por el tanque 1 (Tk1). La alimentación puede ser superior, a través de un rotámetro. El líquido proviene del tanque 3 (Tk3) de donde se extrae e impulsa por medio de una bomba centrífuga. El fluido impulsado por la bomba pasa a través de una válvula neumática de control abierta en falla<sup>2</sup>.

Para la descarga del fluido del Tk1 al Tk2 se cuenta con un vertedero con dos restricciones; una lineal y otra no lineal. El líquido pasa a través de un canal abierto y llega al Tk2, que cuenta con un vertedero con restricción lineal y un canal abierto por medio del cual descarga el líquido al Tk3.

## 1.2. PRINCIPIOS DE INSTRUMENTACIÓN

Los instrumentos son una parte vital de todo proceso industrial, ya que su desempeño depende directamente de su funcionamiento y éste se puede ver afectado por factores internos y externos. Entre los externos se encuentran los criterios de selección y de montaje, y en los internos está la calibración y ajuste de los mismos.

Para la selección de un equipo o instrumento se deben tener en cuenta el principio de funcionamiento, el costo y características como<sup>3</sup> :

- Rango.
- Resolución.
- Ganancia.
- Linealidad.

---

<sup>2</sup>POSADA, Norha Ligia. Implementación de observadores en un sistema de tanques en cascada. Medellín: UPB, 2009. p.3.

<sup>3</sup> CREUS, Solé, A. Instrumentación Industrial. Barcelona: Marcombo. 1997; p2-p10.

- Repetibilidad.
- Exactitud.
- Estabilidad.

De acuerdo a la función del instrumento dentro del proceso se pueden encontrar en varias presentaciones y de esta misma forma pueden ser clasificados, como se muestra a continuación<sup>4</sup>:

- Instrumentos ciegos.
- Instrumentos indicadores.
- Instrumentos registradores.
- Elementos primarios.
- Transmisores.
- Convertidores y bloques de cómputo.
- Controladores.
- Elemento final de control (EFC).

A esto se le suman los errores ocasionados por factores internos como los errores de cero, histéresis, entre otros, que producen errores en la medición y que por lo tanto afectan directamente el funcionamiento del SAC.

---

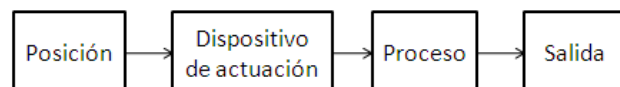
<sup>4</sup> POSADA, Restrepo, N. L. Ingeniería de control 1. Instrumentación . Medellín: UPB 2009;(Notas de clase).

### 1.3. SISTEMAS DE CONTROL

Un sistema de control se puede definir como una interconexión de elementos configurados de tal manera que permiten alcanzar una respuesta del proceso deseada por el usuario. La base para el estudio de un sistema de control son los fundamentos proporcionados por la teoría de los sistemas lineales, en la que se supone una relación de causa y efecto entre sus componentes, éstos se pueden clasificar en dos grandes grupos: los sistemas de control en lazo abierto y los sistemas de control en lazo cerrado o con retroalimentación<sup>5</sup>.

Un sistema de control en lazo abierto es aquel que la salida no se retorna a la entrada, como se muestra en la Figura 3. Un sistema de lazo abierto es un sistema sin retroalimentación y son utilizados para hacer control manual<sup>6</sup>.

Figura 3. Sistema de control en lazo abierto<sup>7</sup>



Fuente: DORF, R., & Bishop, R. Sistemas de control moderno. Madrid: Prentica Hall. 2005; p3.

Un sistema de control en lazo cerrado o con retroalimentación es aquel que tiende a mantener una relación entre la variable de salida del sistema con el *set point* o valor deseado, para lo que se mide la variable controlada y se compara con el *set*

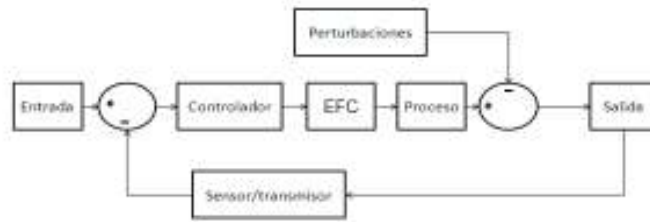
<sup>5</sup>DORF, R., & Bishop, R. Sistemas de control moderno. Madrid: Prentica Hall. 2005; p2.

<sup>6</sup>DORF, Op. Cit. p3.

<sup>7</sup>Ibid.

*point*, mediante esta comparación se define la diferencia y se utiliza como información para el controlador, el cual envía una señal al elemento final de control, ajustando el valor de la variable controlada. En la Figura 4, se muestra una representación por medio de bloques de un sistema con retroalimentación<sup>8</sup>.

Figura 4. Sistema de control en lazo cerrado<sup>9</sup>



Fuente: DORF, R., & Bishop, R. Sistemas de control moderno. Madrid: Prentica Hall. 2005; p3.

Los elementos que conforman el sistema de control tienen la función de modificar los valores de las variables involucradas en el sistema y poder llevar una o varias al valor deseado por el usuario.

#### 1.4. DISEÑO MECÁNICO

Dentro de los procesos industriales el diseño mecánico tiene gran influencia en temas como: cálculos de tubería simple y redes de tuberías, diseño de tanques, diseño de máquinas, sistemas de bombeo, mecánica de materiales, etc. A

<sup>8</sup>DORF, R., & Bishop, R. Sistemas de control moderno. Madrid: Prentica Hall. 2005; p3

<sup>9</sup>DORF, Op. Cit. p3

continuación se da una breve introducción a los elementos del diseño mecánico que intervienen en el rediseño del sistema de tanques en cascada.

**1.4.1. Pérdidas en tubería simple:** Los conductos que se utilizan para transportar fluidos son de dos clases:

- Conductos cerrados o tuberías.
- Conductos abiertos o canales.

El cálculo de la pérdida de carga en las dos clases de conductos presenta problemas similares, pero la pérdida de carga en canales no es de interés en este proyecto, ya que los canales se presentan aguas abajo en el sistema; por otro lado, en esta parte del capítulo se estudiarán las pérdidas en tubería simple, las cuales se dividen en dos clases<sup>10</sup>, pérdidas primarias o mayores y pérdidas secundarias o menores.

Se puede suponer que la presión del fluido que lo atraviesa no varía en toda la longitud del tramo; es decir  $\Delta p = 0$ . Esta suposición se aleja mucho de la realidad pues si se realiza una prueba similar en un tramo de tubería bajo Condiciones normales se observa que  $\Delta p \neq 0$ . Lo cual significa que todos los sistemas cerrados o de tuberías, son sistemas irreversibles<sup>11</sup>.

Antes de iniciar con el estudio de las pérdidas primarias y secundarias, se deben explicar conceptos como el número de *Reynolds* usado para definir el régimen del fluido (turbulento, laminar o de transición) y las ecuaciones de *Bernoulli* y *Darcy-Weisbach* usadas para hallar las pérdidas de energía en sistema.

---

<sup>10</sup>CLAUDIO MATAIX. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Madrid: Ediciones del Castillo. 1986; p203.

<sup>11</sup>Montoya, C. (Lab. 1. Fluidos 2)Pérdidas en tuberías y accesorios PÉRDIDAS EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS. Medellín: UPB. 2008; p2.



**1.4.1.1. Pérdidas menores o secundarias:** Se conocen como pérdidas menores ( $h_l$ ), las pérdidas de cabeza de un sistema ocasionadas por cambios de trayectoria del flujo y todo tipo de accesorios que presente la tubería<sup>12</sup>.

Las pérdidas menores se calculan experimentalmente y son directamente proporcionales al cuadrado de la velocidad del fluido, dependiendo además de un factor de corrección ( $K$ ) propio de cada accesorio el cual se encuentra tabulado por el fabricante o en libros como en CRANE<sup>13</sup>.

Ecuación 1. Pérdidas menores

$$h_l = K \frac{v^2}{2g}, \quad (1)$$

dónde:

$K$ : factor de corrección [Adimensional],

$v$ : velocidad media del fluido [m/s],

$g$ : constante de gravedad [m/s<sup>2</sup>].

Otra forma común de expresar las pérdidas menores, es hacerlo mediante longitudes equivalentes, para lo cual se recurre al uso de nomogramas que se pueden encontrar en CRANE<sup>14</sup> capítulo tres; teniendo como datos de entrada el diámetro interior de tubería y el factor  $K$ . La longitud equivalente se suma a las longitudes del ducto y se utiliza la siguiente ecuación.

Ecuación 2. Pérdidas menores (longitud equivalente)

$$h_l = f \frac{L_{eq}}{D} \frac{v^2}{2g}, \quad (2)$$

---

<sup>12</sup> Montoya, Op. Cit. p2.

<sup>13</sup> CRANE, División de Ingeniería. Flujo de Fluidos, en válvulas, accesorios y tuberías. McGraw-Hill, 1992 p7.

<sup>14</sup> CRANE, Op. Cit. p2

dónde:

$L_{eq}$ : longitud equivalente del accesorio [m],

$D$ : diámetro de la tubería [m],

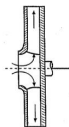
$v$ : velocidad media del fluido [m/s],

$g$ : constante de gravedad [m/s<sup>2</sup>].

**1.4.2. Bombas:** La bomba es una máquina que absorbe energía y la transfiere a un fluido, la cual permite que el fluido pueda ser transportado de un lugar a otro. Las bombas se pueden emplear para transportar toda clase de líquidos como: agua, aceites, combustibles, etc.<sup>15</sup>.

**1.4.2.1. Bombas dinámicas:** Las bombas dinámicas son las que añaden al fluido cantidad de movimiento por medio de álabes móviles que giran, y están en contacto directo con el fluido<sup>16</sup>. Se pueden clasificar en: Giratorias (centrífugas), axiales y mixtas, como se ve en la Figura 5.

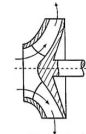
Figura 5. Clasificación de las bombas dinámicas



(a) Bomba centrífuga<sup>17</sup>.



(b) Bomba axial<sup>18</sup>.



(c) Bomba mixta<sup>19</sup>.

Fuente: CHAIN, N. S., & CHAIN, R. S. (1991). Preparacion y evaluacion de proyectos.MEXICO DF: McGraw-Hill.

<sup>15</sup> MATAIX, Op. Cit.p369

<sup>16</sup> MATAIX, Op. Cit.p370

<sup>17</sup>CHAIN, N. S., & CHAIN, R. S. (1991). Preparacion y evaluacion de proyectos.MEXICO DF: McGraw-Hill.

<sup>18</sup> Ibid

<sup>19</sup> Ibid

**1.4.2.2. Bombas de desplazamiento positivo:** Son aquellas que poseen un contorno móvil, al cambiar el volumen de éste, el fluido es obligado a pasar por un espacio más pequeño que en el que se encontraba actualmente<sup>20</sup>. Existen diversos tipos: de pistón, de engranajes y de tornillo.

**1.4.3. Mecánica de materiales:** La mecánica de materiales se define como la rama de la mecánica aplicada que busca comprender el comportamiento de los cuerpos sólidos al interactuar con diferentes cargas y fuerzas.

Uno de los objetivos más relevantes de la mecánica de materiales es dar los medios para analizar y diseñar diferentes máquinas o estructuras. Tanto en el análisis como en el diseño de una estructura, involucra determinar los esfuerzos y las deformaciones. En este trabajo se utiliza para el análisis de la estructura del sistema y para el análisis de los tanques que almacenan el líquido.

**1.4.3.1. Esfuerzos:** Se entiende como esfuerzo la acción o respuesta que genera la aplicación de una carga de forma continua sobre una sección transversal<sup>21</sup>, según esto se puede definir el esfuerzo en la Ecuación 3.

Ecuación 3. Esfuerzo

$$\sigma = \frac{P}{A}, \quad (3)$$

dónde:

$\sigma$ : esfuerzo normal [Pa],

$P$  : fuerza aplicada o carga [N],

$A$  : área de la sección transversal [m<sup>2</sup>].

---

<sup>20</sup>MATAIX, Op. Cit.p.371.

<sup>21</sup> BEER Ferdinand; Russell Johnston, Mecánica de materiales. Bogota: McGraw-Hill.1994; p3.

**1.4.3.2. Esfuerzo último y esfuerzo admisible:** En las aplicaciones de ingeniería el objetivo final es el conocimiento de los esfuerzos, para utilizarlo en las siguientes aplicaciones<sup>22</sup>:

- Análisis de estructuras y máquinas existentes, para predecir su comportamiento bajo cargas especificadas.
- Diseño de nuevas estructuras y máquinas de cómo cumplen su función de manera segura y económica.

Para esto se define el esfuerzo último como el máximo esfuerzo que soporta el material. Éste se encuentra en gráficas o en tablas y también se define el esfuerzo admisible como el esfuerzo en los puntos máximos de operación.

Un elemento estructural debe diseñarse de modo que su esfuerzo último sea bastante mayor que el esfuerzo que el elemento llevará en Condiciones normales de uso. Este esfuerzo menor es el esfuerzo admisible. De lo anterior se puede definir un factor de seguridad como<sup>23</sup>:

Ecuación 4. Factor de seguridad

$$F.S. = \frac{\sigma_u}{\sigma_{adm}}, \quad (4)$$

dónde:

$F.S.$ : factor de seguridad [adimensional],

$\sigma_u$ : esfuerzo último [Pa],

$\sigma_{adm}$ : esfuerzo admisible [Pa].

Este criterio será usado en este trabajo para definir si la estructura del sistema y de los tanques de almacenamiento de líquido soportan las cargas a las que

---

<sup>22</sup> BEER. Op. Cit. p24

<sup>23</sup> BEER. Op. Cit. p25

estarán sometidos y en caso de una sobrecarga del sistema cuanto más soportará sin llegar a fallar.

**1.4.3.3. Consideraciones de diseño:** A continuación se muestran las diferentes consideraciones que se deben tener en cuenta al diseñar o analizar una máquina o estructura<sup>24</sup>:

- Variabilidad en las propiedades de los materiales.
- Fatiga.
- Cargas futuras.
- Incertidumbre en el método de cálculo.
- Deterioro ambiental.
- Importancia del elemento en el sistema.
- Riesgos de vida y salud.

Estas consideraciones son la base para el diseño de la estructura y de los tanques de almacenamiento, si alguno de estos parámetros no se tiene en cuenta a la hora del diseño del sistema puede ocasionar fallas en la operación o generar gastos extras en correcciones de diseño.

---

<sup>24</sup> BEER. Op. Cit. p26.

## 2. DISEÑO PRELIMINAR

En este capítulo se presentan los resultados de la búsqueda de trabajos similares que permitirán conocer el estado actual de este tipo de procesos y hacia dónde se dirigen, con el objetivo de utilizar éstos para plantear mejoras en el funcionamiento del proceso que se trabaja. Este capítulo se enfoca en conocer a fondo el sistema de tanques.

### 2.1. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

En esta parte se mostrarán algunos trabajos realizados por otras personas enfocadas en esta misma línea y el estado actual del sistema, con cada uno de los componentes que lo conforman.

**2.1.1. Estado del arte:** Se puede encontrar una amplia gama de trabajos realizados enfocados en sistemas de control tanto en la industria como en la academia, el estudio de esto tiene como objetivo saber que se ha hecho y como se ha hecho para así tener una visión más abierta sobre las alternativas de rediseño que se pueden plantear.

**2.1.1.1. Universidad EAFIT:** La universidad EAFIT cuenta con un Laboratorio de Control Digital que nació como respuesta a la necesidad de soporte práctico en las materias relacionadas con Electrónica y Control<sup>25</sup>.

Algunos de los recursos con que cuenta este laboratorio son<sup>26</sup>:

- Controladores lógicos programables (PLC).
- Tarjetas de adquisición de datos.
- Variador de velocidad.
- Tanques instrumentados.

De lo anterior se puede resaltar los tanques instrumentados, ya que son una de las herramientas de estudio más utilizadas y aplicadas en las diferentes instituciones educativas, ya que no es un sistema complejo y es fácil de comprender su comportamiento.

**2.1.1.2. Universidad Pontificia Bolivariana :** la UPB cuenta con un sistema de tanques en cascada a pequeña escala en el Laboratorio de Electrónica con un funcionamiento y una instrumentación similar al que se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias como se ve en la Figura 6, las diferencias radican en el tamaño, tipo de elemento final de control, y la falta de canales de comunicación que permiten variar el comportamiento dinámico del sistema de acuerdo a la combinación que se haga de los mismos.

---

<sup>25</sup>Murillo Hoyos, H. A. (s.f.). Universidad EAFIT. Recuperado el 15 de Febrero de 2010, de <http://www.eafit.edu.co/>

<sup>26</sup> Ibid

Figura 6. Sistema de tanques del Laboratorio de Electrónica de la UPB



**2.1.2. Antecedentes:** En la Tabla 1 se presentan los instrumentos que componen el sistema de tanques en cascada del Laboratorio de Operaciones Unitarias y algunas especificaciones de cada uno de ellos.

Tabla 1. Instrumentación actual del sistema de tanques<sup>27</sup>.

Instrumento	Marca	Modelo
Válvula de control	Kieley & Mueller	1056
Convertidor/Posicionador de la válvula	Honeywell	EP2301-01 9645
Transmisor de nivel	Fischer & Porter	50LP 3111BA
Convertidores P/I	Foxboro	892-2-Y
Controlador	Foxboro	762CNA
Reguladores de presión	Kieley & Mueller	467
Rotámetro	Fischer & Porter	-
Fuente de corriente directa	Foxboro	SPEC200 2ARPS -A6
Indicadores de vidrio	-	-
Vertedero	-	-
Bomba	-	-

A continuación se muestra el estado actual de cada uno de los instrumentos mencionados en la Tabla 1.

<sup>27</sup>García Rivera, P. Implementación y puesta a punto de un sistema de control en cascada. Medellín: UPB. 2006; p 6.



### **Válvula de control**

En la Figura 7 se muestra el estado actual del elemento final de control.

Figura 7. Válvula de control Kieley & Mueller, modelo 1056 equipada con un convertidor/posicionador Honeywell EP2301



La valvula presenta muchos años de uso, error de histéresis y fugas en le cuerpo.

### **Transmisores de nivel**

El sistema cuenta con dos transmisores de nivel mostrados en la Figura 8.

Figura 8. Transmisor de nivel Fischer & Porter, modelo 50LP 3111BA



En general los transmisores de nivel se encuentran en buen estado.

## Convertidores P/I

El sistema cuenta con 4 convertidores de P/I, mostrados en la Figura 9.

Figura 9. Convertidor P/I Foxboro, modelo 892-2-Y



Se recomienda su cambio si se cambia la valvula de control, en caso contrario se recomienda su revisión.

## Controlador

En la Figura 10 (a) se muestra el controlador y en la Figura 10 (b) se muestra el sistema de conexión y la alimentación.

Figura 10. Controlador Foxboro, modelo 762CNA



(a) Controlador



(b) Conexión del controlador

Se encuentra en buen estado, pero se recomienda arreglar el cableado.

## Reguladores de presión

El sistema cuenta con dos reguladores de presión mostrados en la Figura 11.

Figura 11. Regulador de presión Kieley & Mueller, modelo 467



No presentan problemas en la operación.

## Rotámetro

En la Figura 12 se muestra el rotámetro del sistema de tanques en cascada.

Figura 12. Rotámetro Fisher & Porter



El rotámetro es sólo un indicador visual y no se encuentra con su flotador original se recomienda su cambio.

### **Indicador de nivel de vidrio**

El sistema cuenta con 2 de estos indicadores de vidrio, uno para el Tk1 y otro para el Tk2, en la Figura 13 se observa el indicador del Tk1.

Figura 13. Indicador de vidrio, el sistema cuenta con dos de estos elementos, uno para cada tanque



Estos indicadores son sólo utilizados como indicador visual.

### **Vertedero**

El sistema cuenta un vertedero lineal y un vertedero no lineal mostrados en la Figura 14.

Figura 14. Vertederos que están ubicados en el Tk1



### **Moto bomba**

En la figura 15 se muestra la moto-bomba del sistema de tanques en cascada.

Figura 15. Moto bomba



Debe de ser reemplazado tanto el motor como la bomba, ya que tienen muchos años de uso y presentan inconvenientes en la operación.

Para mayor detalle en la descripción del estado de algunos de los elementos mencionados, se describirán en la sección 2.2.1. Inconvenientes del sistema.

Las especificaciones técnicas de cada uno de estos equipos y otros elementos del sistema como manómetros y tanques de acumulación, se describirán en la sección 3.1.2. Cotizaciones.

**2.1.3. Tanques (Condición actual):** En el Anexo D. Planos se encuentran los planos de taller en condición actual del TK1 y del TK2, respectivamente en el plano 01. y el plano 02.

## **2.2. OPORTUNIDADES DE MEJORA**

En este apartado se describen los diferentes problemas y limitaciones que posee el sistema de tanques, los elementos que se recomienda sean reemplazados y los nuevos instrumentos que requieren ser implementados, ya sea porque no están en

buen estado o porque simplemente ya están obsoletos con respecto a la tecnología que puede ser usada. Además de lo anterior se presentarán los criterios de selección de la instrumentación y diferentes propuestas de automatización.

**2.2.1. Inconvenientes del sistema:** El sistema de tanques presenta diferentes dificultades a la hora de trabajar en este sistema, debido al estado de alguno de los instrumentos que lo componen, en la Tabla 2 se muestran los instrumentos que no funcionan de forma correcta y cuál es el problema.

Tabla 2. Componentes con problemas de funcionamiento en el sistema de tanques en cascada

Instrumento o equipo	Dificultad	Comentario
Válvula de control	Histéresis/fugas en el cuerpo	Debe ser remplazada, muchos años de uso.
Bomba	Histéresis	Debe ser remplazada, muchos años de uso.
Motor de la bomba	Dificultad de arranque en algunos momentos.	Debe ser remplazado, por un motor trifásico para implementar un variador de velocidad.
Manómetros	Afectados por vibraciones	Se recomienda que los que están más próximos a la bomba sean remplazados por manómetros con glicerina
convertidor/ posicionador	Error de cero	Se recomienda su cambio sí se reemplaza la válvula. En caso contrario se recomienda su calibración.
tanques	Desnivel	Por estética y para poder implementar diferentes vertederos.

Además de lo anterior el sistema de tanques presenta limitantes en cuanto a las variables que se pueden controlar, sólo se controla el nivel en los dos tanques y no permite la implementación de estrategias de control por computador, como: control inteligente, digital, no lineal, entre otras. Esto debido a que no cuenta con elementos necesarios para realizarlo. Por esto se recomienda la implementación de instrumentos o equipos nuevos como los que se mencionan en la Tabla 3.

Tabla 3. Nueva instrumentación

Instrumento o equipo	Comentario
Medidor de flujo	Se debe implementar para habilitar el control de flujo en el sistema.
Variador de velocidad	Se debe implementar para habilitar el sistema y realizar control donde el elemento final de control es la moto bomba.
PLC	Se implementará como sistema de adquisición de datos cuando se trabaje control por computador, pero también se puede utilizar como controlador del sistema.
Manómetros	Para indicación en diferentes puntos del sistema donde se hace necesaria la medición y no se cuenta con ellos.

Se debe de mencionar también que los tanques de acumulación requieren ser reemplazados, conservando el mismo diseño por requerimiento del director del laboratorio, pero en diferente material, que permita visualizar el nivel y que cumpla con las condiciones de diseño que este elemento requiere, además de lo anterior se alargará el tiempo de retardo del sistema incrementando la longitud de la canal que comunica el Tk1 con el Tk2.

### 2.3. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

En esta sección se define la instrumentación que va estar ubicada en el nuevo sistema con base en la estrategia de control que sea seleccionada. Los criterios de selección de la instrumentación y la estrategia de control, están establecidos buscando que el sistema de tanques cumpla con su labor como proceso utilizado para la docencia y la investigación y no sólo como proceso industrial a escala. A

continuación se presenta el proceso de selección de la estrategia de control y de la instrumentación.

**2.3.1. Selección de la configuración para el proceso:** En sistemas automatizados se pueden tener varios tipos de estrategias de control según los elementos que estén instalados, las siguientes estrategias están basadas en diferentes elementos de control como lo son un PID (controlador industrial), control por computador y PLC.

**2.3.1.1. Propuesta A:** Esta propuesta consiste en dejar el sistema como está (Control de nivel) pero reemplazando algunos equipos obsoletos y agregar el medidor/transmisor de flujo, como se puede ver en la Figura 16.

**2.3.1.2. Propuesta B:** Esta propuesta consiste en conservar el principio de funcionamiento del sistema pero agregándole diferentes elementos como medidores de flujo y un variador de velocidad para la bomba, con el objetivo de realizar control de flujo y nivel, por medio del controlador, como se puede ver en la Figura 17.

**2.3.1.3. Propuesta C:** Esta propuesta consiste en conservar el principio de funcionamiento del sistema pero agregándole diferentes elementos como medidor/transmisor de flujo, un variador de velocidad para la moto-bomba y con el valor agregado que el control podría ser realizado con el PLC o con el computador como se ve en la Figura 18.





Figura 17. Propuesta B

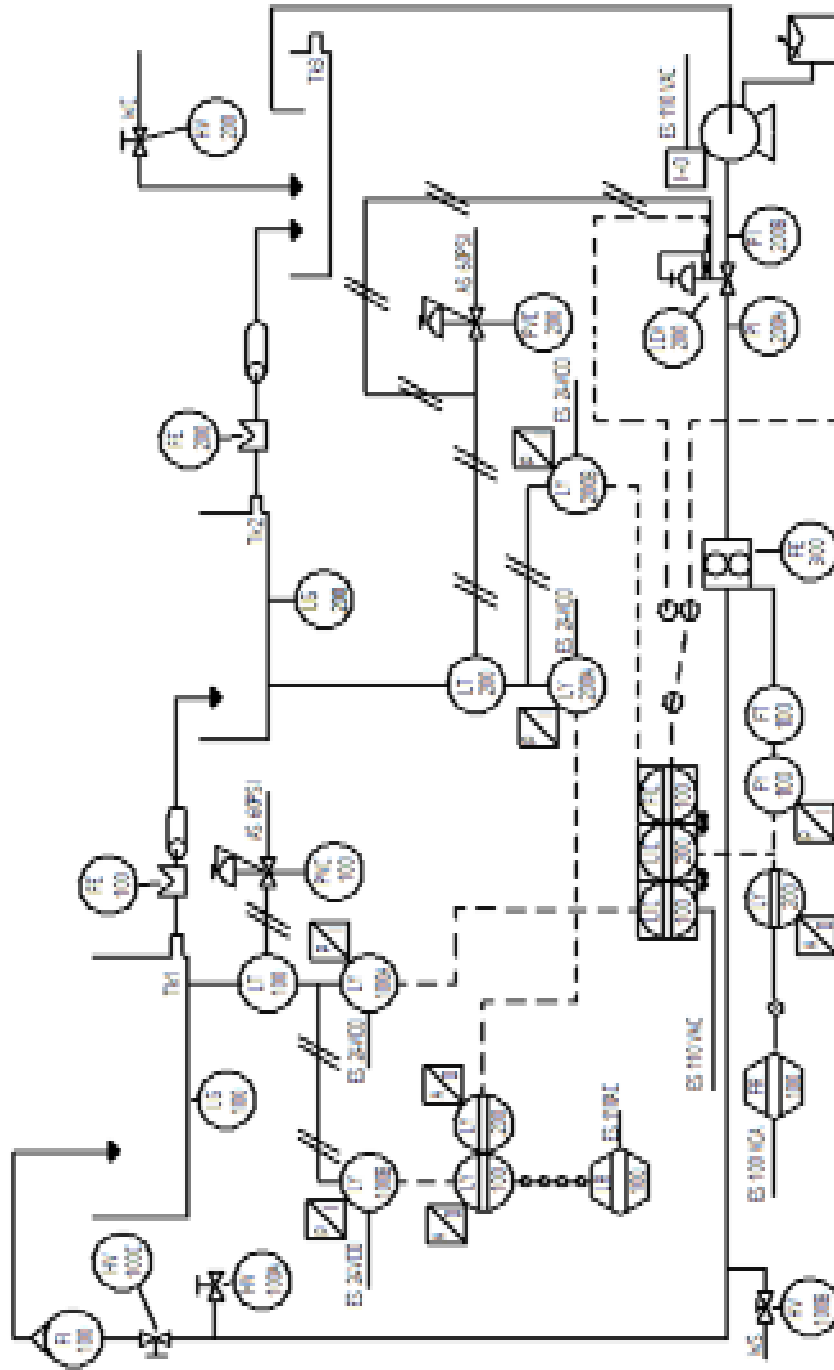
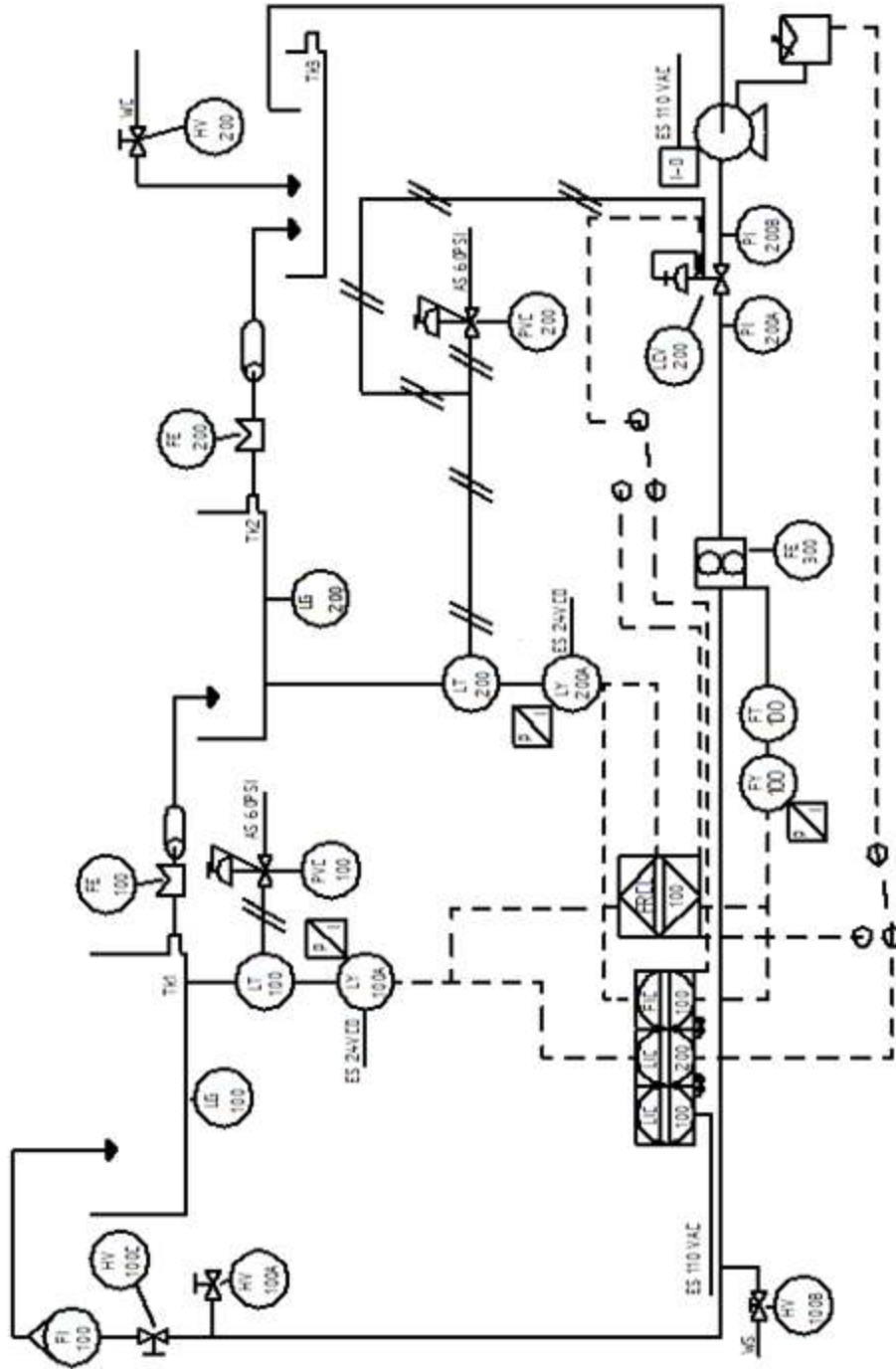


Figura 18. Propuesta C



**2.3.1.4. Selección de la propuesta más adecuada:** En la Tabla 4 se muestra cuáles fueron los criterios de selección para la configuración más adecuada del sistema.

Se debe aclarar que el escalafón utilizado para la calificación de la propuesta es 1-insuficiente, 2-regular, 3-aceptable, 4-bueno y 5-excelente, y la propuesta seleccionada será la que mayor valor obtenga después de sumar todos los valores de los criterios de selección.

Para evaluar las propuestas se definieron y utilizaron los siguientes criterios:

- Versatilidad: Posibilidad de realizar diferentes estrategias de control en el sistema.
- Tecnología: Consiste en evaluar cada una de las propuestas en términos tecnológicos, como sensores, tipos de elementos de control y posibilidades de implementación de nuevas estrategias.
- Facilidad de implementación: Según la cantidad de elementos adicionales que se pretenda agregar al sistema actual es mas compleja su implementación.
- Facilidad de operación: Esto depende del usuario del sistema, pero se evalúa si se pueden realizar prácticas de pregrado, hasta prácticas de posgrado

Tabla 4. Selección de la propuesta de instrumentación

Propuesta	A	B	C
Versatilidad	3	4	5
Tecnología	2	4	5
Facilidad de implementacion	5	4	3
Facilidad de operación	4	5	5
Total	14	17	18

Según la tabla anterior para cumplir todas las especificaciones la propuesta más adecuada es la C.

**2.3.2. Selección de la instrumentación (Principios de operación):** Para rediseñar el sistema es necesario realizar, la selección de la instrumentación que se quiere introducir en el sistema. Para esto se iniciará trabajando con la propuesta C, ya que es la que tiene en cuenta todas las mejoras del proceso. En la Tabla 5 se muestran los criterios de evaluación

Tabla 5. Ponderación de los Criterios de evaluación

Ponderado	Explicación		
	Caída de presión	Costo	Precisión
3	Baja	Bajo	Alto
2	Media	Medio	Medio
1	Alta	Alto	Bajo

Es necesario resaltar que algunos de los equipos sólo se van a reponer como son manómetros, reguladores de presión y vertederos.

**2.3.2.1. Medidor de flujo:** Según las Condiciones de flujo del sistema actual, se seleccionaron los tipos de funcionamiento y los criterios de selección, como se puede ver en la Tabla 6. El total se calcula sumando los resultados de cada ítem.

Tabla 6. Tabla de selección de medidor de flujo

Criterios de selección para el medidor de flujo(*)				
Principio de funcionamiento	Caída de presión	Precisión	Costo	Total
Presión diferencial	1	2	3	6
Turbina	2	3	2	7
Magnético	3	3	1	7

\* El mayor valor es el seleccionado según los criterios de evaluación de la tabla.

Se selecciona el tipo turbina por su bajo costo y su adaptabilidad al proceso, pero si se puede contar con un tipo magnético es lo ideal, ya que es el más apto para el sistema, pero tiene un alto costo comparado con los otros sensores.

**2.3.2.2. Válvula de control:** Según las Condiciones de flujo del sistema actual, se proponen diferentes tipos de funcionamiento y los criterios de selección, como se puede ver en la Tabla 7. El total se calcula sumando los resultados de cada ítem.

Tabla 7. Tabla de selección válvula de control

Criterios de selección para la válvula de control(*)					
Tipo de funcionamiento	Actuador	Caída de presión	Elemento final de control	Bajos caudales	Total
Compuerta	2	1	3	1	7
Mariposa	2	2	3	2	9
Globo	3	2	2	3	10

\* El mayor valor es el seleccionado según los criterios de evaluación de la tabla.

**2.3.2.3. Moto-Bomba:** En . El total se calcula sumando los resultados de cada ítem.

**2.3.2.4.** Tabla 8 se muestran los dos criterios principales de selección para la bomba. . El total se calcula sumando los resultados de cada ítem.

Tabla 8. Tabla de criterios de selección para el tipo de bomba

Criterios de selección para la bomba(*)			
Tipo de funcionamiento	Cabeza	Caudal	Total
Axial	1	3	4
Centrífuga	3	2	5
Mixta	2	2	4

\* El mayor valor es el seleccionado según los criterios de evaluación de la tabla.

El resto de la instrumentación será la misma de la configuración actual, la cual se puede observar en la Tabla 1.

## 2.4. DISEÑO MECÁNICO PRELIMINAR

En esta parte del capítulo se presentan los cálculos realizados para tanques, estructuras y red de tuberías, de forma detallada. Además, se mostrará el proceso de selección del material más adecuado para los tanques.

**2.4.1. Tanques:** El sistema actual cuenta con dos tanques fabricados en lámina de acero, inicialmente se evaluó el comportamiento que tienen estos tanques bajo la carga máxima a que se someten en el trabajo (Tanque lleno). La Ecuación 5 muestra la forma de cómo calcular la carga hidrostática en un objeto.

Ecuación 5. Presión hidrostática<sup>28</sup>

$$P_{Columna\ de\ agua} = \rho gh \quad (5)$$

dónde:

$P_{Columna\ de\ agua}$ : presión total [KPa],

$\rho$ : densidad del líquido [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$h$ : altura de la columna de líquido [m],

$g$ : Constante de gravedad [ $\text{m}/\text{s}^2$ ].

En la Tabla 9 se muestran los resultados de carga a los que están sometidos los tanques.

---

<sup>28</sup>CLAUDIO MATAIX. Mecanica de fluidos y máquinas hidráulicas. Madrid: Ediciones del Castillo.1986; p46.

Tabla 9. Condiciones de trabajo actual del sistema de tanques

Tanque	Altura de líquido [m]	Gravedad [m/s <sup>2</sup> ]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Esfuerzo [KPa]
Tk1	0,15	9,8	1000	1,47
Tk2	0,11	9,8	1000	1,08

El siguiente paso es simular en *Solid edge ST3* cada uno de los tanques sometiéndolos a la carga máxima calculada y los resultados se muestran la Figura 19 y Figura 20.

Figura 19. Estado de esfuerzos Tk1

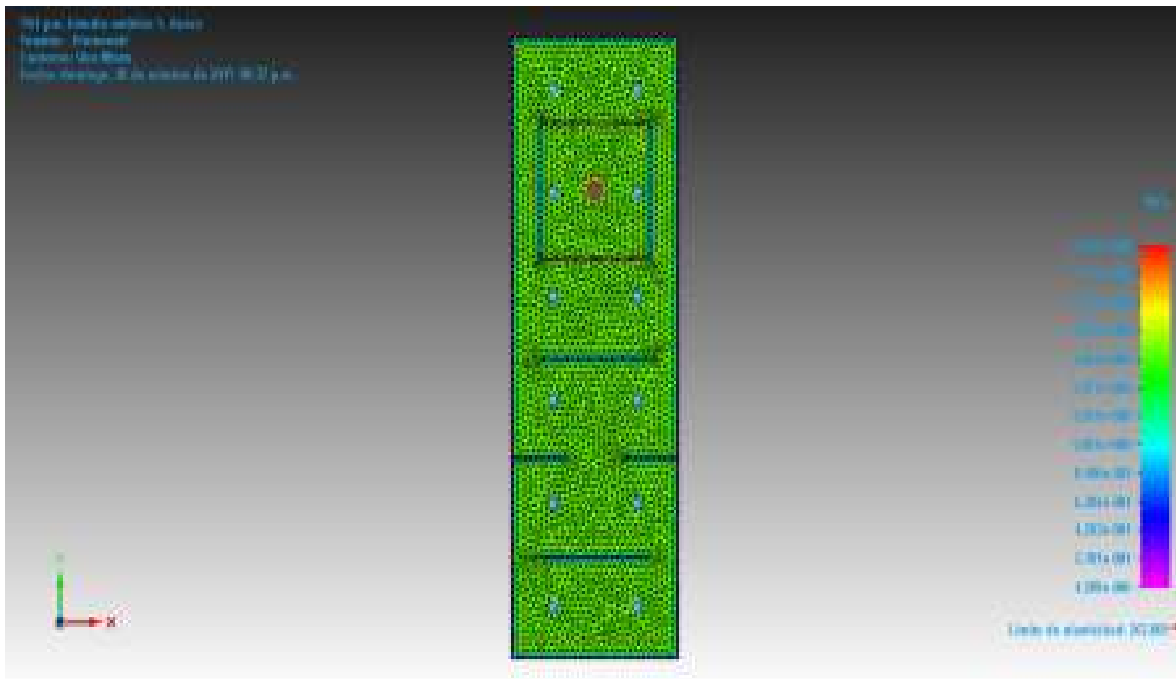
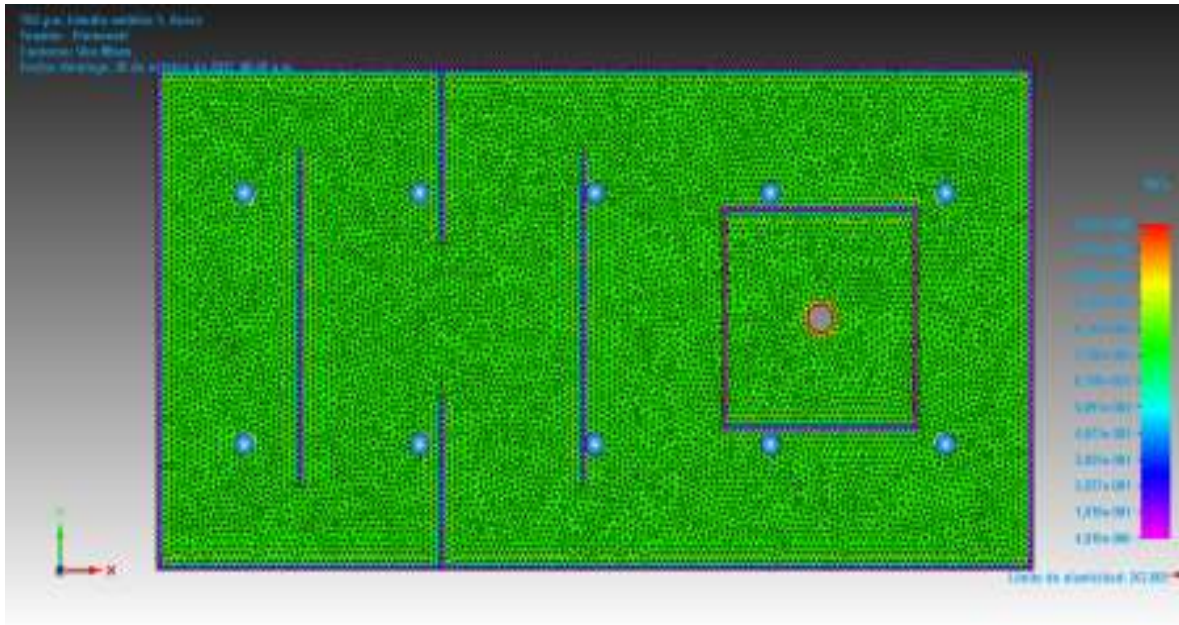




Figura 20. Estado de esfuerzos Tk2



Claramente el material en que están fabricados los tanques en el sistema actual está sobre diseñado como se puede ver en la Figura 19 y en la Figura 20, ya que los esfuerzos a los que se somete el material son casi nulos.

De lo anterior se puede decidir que los tanques se pueden fabricar en un material, que cumpla con las restricciones de diseño y además tenga menos costo, tanto en el material como en la fabricación de la pieza.

**2.4.1.1. Configuración:** La única modificación que los tanques presentan, comparándolos con los actuales son a la salida de líquido.

A continuación se presenta el proceso de selección del material más adecuado de acuerdo a un ramillete de materiales, mediante el método de convergencia controlada<sup>29</sup>.

**2.4.1.1.1. Método de la convergencia controlada:** Para continuar con la selección del material más adecuado se aplicara el método de la convergencia

<sup>29</sup>Cruz, L. J. (Semestre 1 de 2011). Selección de materiales. Métodos de selección de materiales . Medellín: UPB (Notas de clase).

controlada, recomendado para rediseños, ya que utiliza una comparación del material actual con conjunto de materiales, como se ve en la Tabla 10.

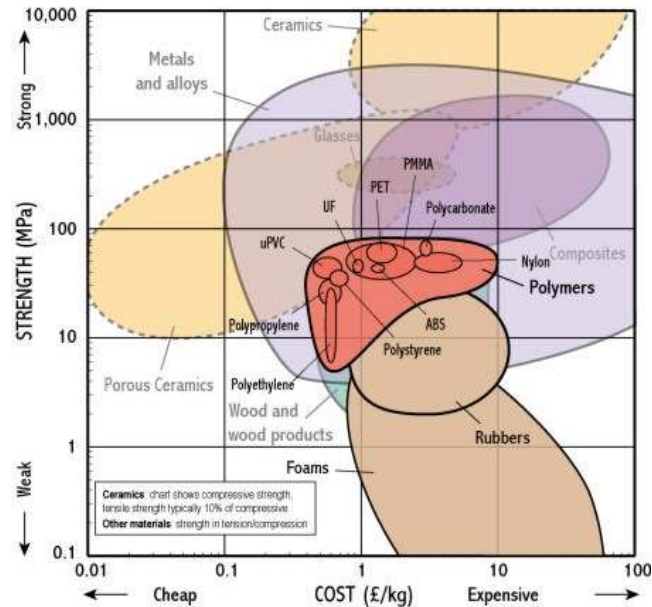
Tabla 10. Tabla método de la convergencia controlada<sup>30</sup>

Alternativas	ALT. 1	ALT. 2	ALT. 3	ALT. 4	ALT. 5	ALT. 6	ALT. 7
CRITERIO	SAE A36	PMM A	PS Cristal	PVC	Nylon	ALEACION DE AL H14(99%AL)	ALEACION DE Mg AZ31
Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	7860	1190	1050	1380	1070	2710	1770
Resistencia mecánica [MPa]	250	80	50	54	100	100	250
Costo RELATIVO	1	0,7	0,6	0,4	0,9-1	1,1	1,1
Durabilidad		0	0	0	0	S	S
Costo		+	+	+	S	-	-
Costo de manufactura		+	+	+	+	-	-
Resistencia mecánica		+	+	+	+	+	S
Densidad		+	+	+	+	+	+
Vítreo		+	+	S	S	S	S
Σ+		5	5	4	3	2	1
Σ-		1	1	1	1	2	2
ΣS		0	0	1	2	2	3

Se puede ver en la Tabla 10 que hay dos divisiones, las cuales son: la primera para los datos preliminares, que se deben conocer para realizar un adecuado proceso de selección. Se debe mencionar que el costo relativo se obtuvo de la Figura 21, que es un mapa de propiedades. La segunda parte de la tabla es en la cual se le otorgan las calificaciones a cada material, las cuales son “+” para cuando se considera mejor o mayor, “-” para cuando es peor o menor y “S” para cuando se está en desacuerdo o no se tiene certeza<sup>31</sup>.

<sup>30</sup>Callister, W. D. Ciencia e ingeniería de los materiales. Barcelona: Reverte S.A.

<sup>31</sup>Cruz, L. J. (Semestre 1 de 2011). Selección de materiales. Métodos de selección de materiales. Medellín: UPB (Notas de clase).

Figura 21. Mapa de propiedades<sup>32</sup>

Fuente: Recuperado el 15 de 10 de 2011, de [http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive\\_charts/energy-cost/NS6Chart.htm](http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/energy-cost/NS6Chart.htm)

**2.4.1.1.2. Resultados:** De la Tabla 10 de selección se debe concluir que los dos materiales con las mejores calificaciones son los siguientes:

- PMMA,
- PS cristal.

Como no se puede deducir cuál de los dos materiales se comporta mejor y sus propiedades son muy similares, se determinará el mejor comportamiento por medio de una nueva comparación por el método de la convergencia controlada como se ve en la Tabla 11 y una simulación en *Solid Edge ST3*, sometiendo al material ganador a una carga igual a la que están sometidos en servicio, definida en la Tabla 9, para comprobar su buen comportamiento en servicio.

<sup>32</sup>Recuperado el 15 de 10 de 2011, de [http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive\\_charts/energy-cost/NS6Chart.htm](http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/energy-cost/NS6Chart.htm)

Tabla 11. Comparación final por el método de la convergencia controlada<sup>33</sup>

ALTERNATIVA	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2
CRITERIO	PMMA	PS cristal
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	1190	1050
Resistencia mecánica [MPa]	80	50
Costo RELATIVO	1	0,9-1
Durabilidad		-
Costo		+
Costo de manufactura		S
Resistencia mecánica		-
Densidad		S
Vítreo		S
$\Sigma+$		1
$\Sigma-$		2
$\Sigma S$		3

Según la tabla anterior la alternativa 1 (PMMA) es más favorable ya que en costo no hay mucha diferencia y tiene mejores propiedades, a continuación en la Figura 22 y Figura 23 se muestra la simulación de carga para el Tk1 Y Tk2 respectivamente

<sup>33</sup>Callister, W. D. Ciencia e ingeniería de los materiales. Barcelona: Reverte S.A.

Figura 22. PMMA, simulación de carga Tk1

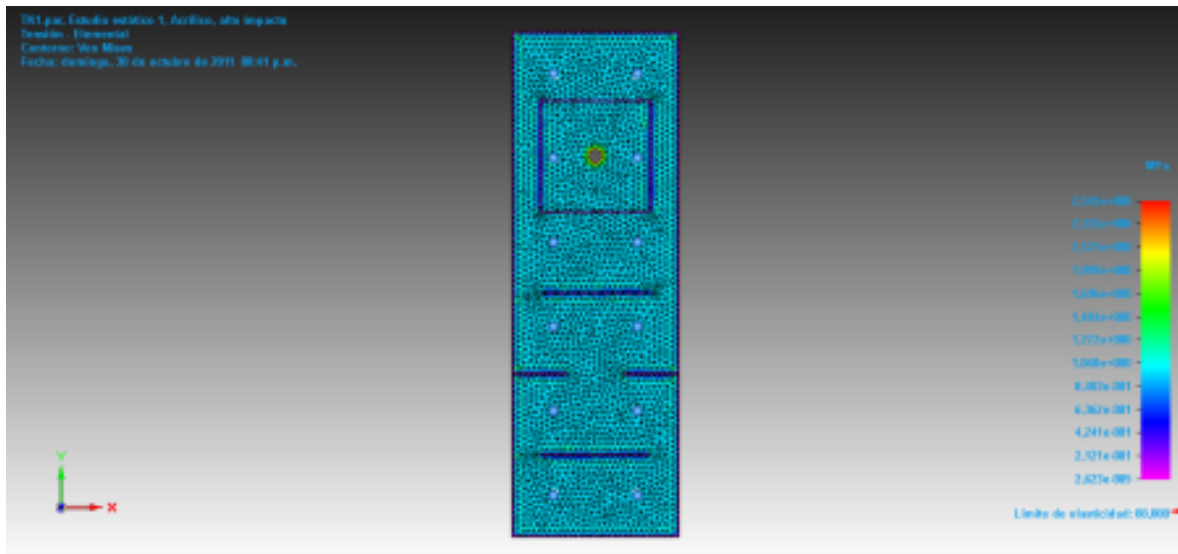
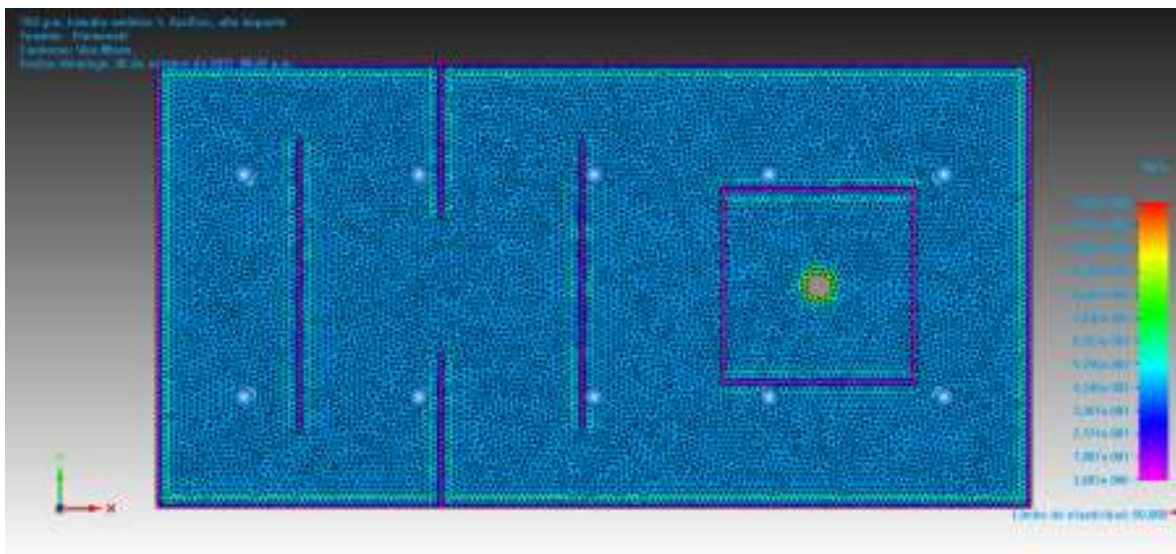


Figura 23. PMMA, simulación de carga Tk2



Se observa que el material claramente es capaz de soportar la carga a la que se somete en operación. A continuación se realiza el diseño de la estructura que va a soportar los tanques ya diseñados.

**2.4.2. Estructura:** Inicialmente se diseña una estructura para el Tk1 con un perfil en “L” de 1”x1”, como se ve en el catálogo de perfiles en el Anexo C. Inicialmente se utiliza una configuración simple para evaluar su comportamiento bajo carga, en la Tabla 12 se muestra la carga a la que está sometida cada estructura.

Tabla 12. Cálculo de carga para cada estructura según el tanque que soportan

Tanque	Volumen[m <sup>3</sup> ]	Peso de los tanques[N]	Carga [N]	Área [m <sup>2</sup> ]	FS	Esfuerzo[ Kpa]
TK1	0,0425	34,335	416,68	0,28	2	3,24
TK2	0,0449	31,392	440,66	0,42	2	2,23

**2.4.2.1. Análisis de carga:** El análisis de carga se realiza con un factor de seguridad de aproximadamente dos, para garantizar el buen funcionamiento en operación.

Inicialmente se toma una estructura simple sin refuerzos de ningún tipo y se evalúa con una carga de 3,5 KPa para ambas estructuras los resultados se observan en las Figura 24 y Figura 25.

Figura 24. Estado de esfuerzos estructura Tk1 inicial

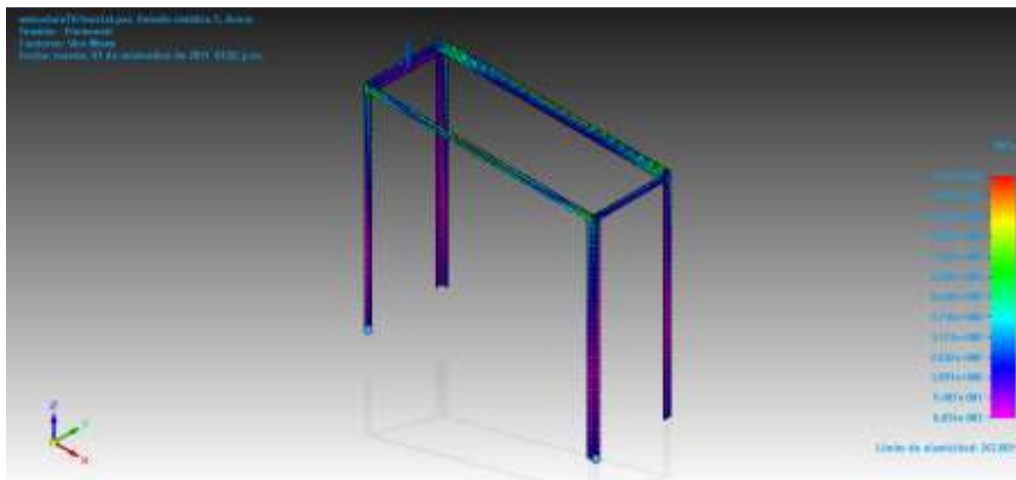
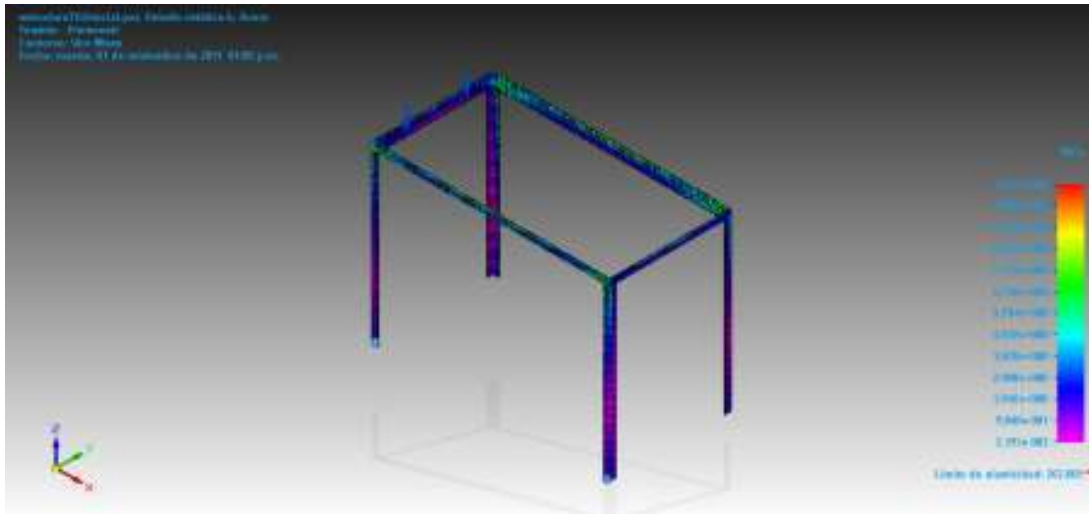


Figura 25. Estado de esfuerzos estructura Tk2 inicial



Con el objetivo de mejorar el comportamiento de la estructura, se le adicionan unas barras en la parte inferior de la estructura, para agregar estabilidad, el resultado del análisis de carga se observa en la Figura 26 y Figura 27.

Figura 26. Estado de esfuerzos estructura Tk1 final

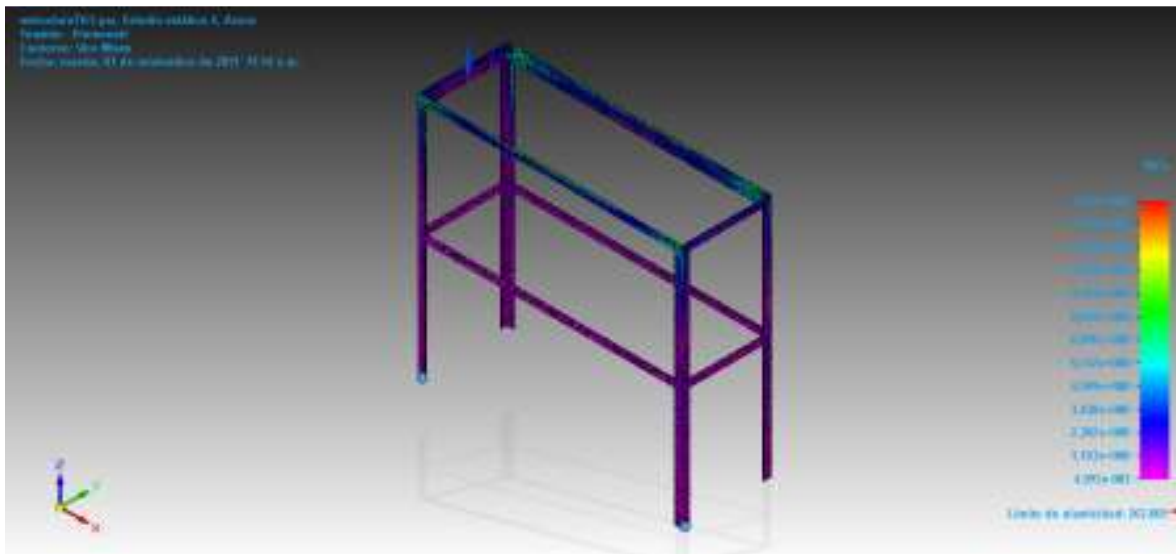
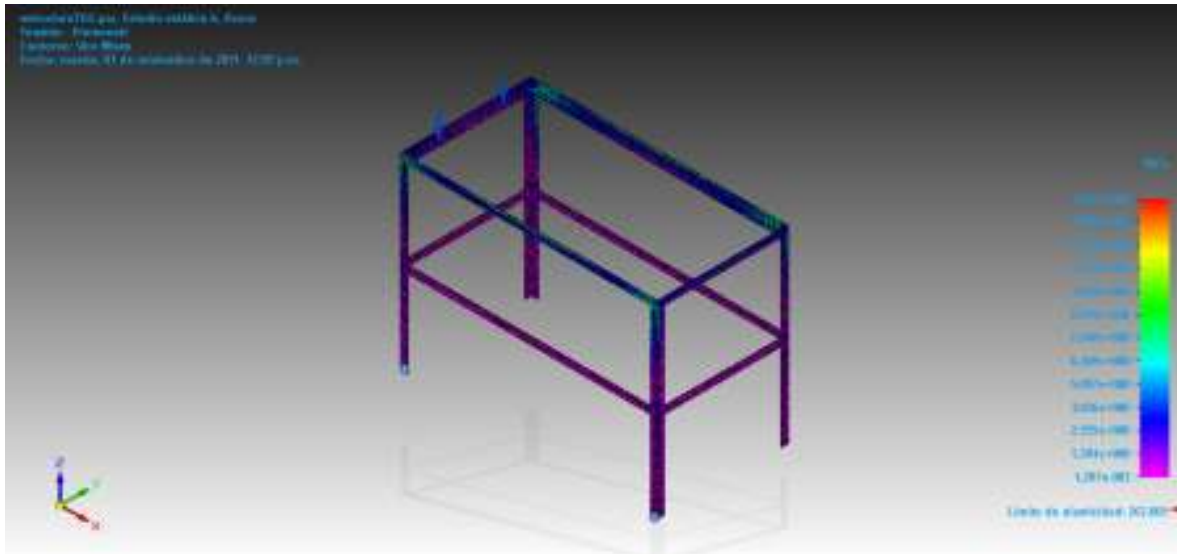


Figura 27. Estado de esfuerzos estructura Tk2 final



En ambos tanques las simulaciones de carga muestran que con el refuerzo se aumentan los esfuerzo en aproximadamente 2 MPa en las esquinas de la estructura, pero no llega al límite de la falla y se le agrega mucha más estabilidad al sistema.

**2.4.3. Red de tuberías:** En la Figura 28 se muestra las Condiciones de trabajo del sistema actual conservando distancias, diámetros de tuberías, en la Figura 29 se muestra la nueva configuración del sistema, incluyendo los nuevos equipos a instalar según la estrategia de control escogida anteriormente.

A continuación se presentan todas las mediciones realizadas para poder simular el sistema de tuberías por medio del programa *Pipe Flow Expert*, que se realizan en la sección 3.2.1. Red de tuberías.



Figura 28. Sistema actual (Medidas en centímetros)

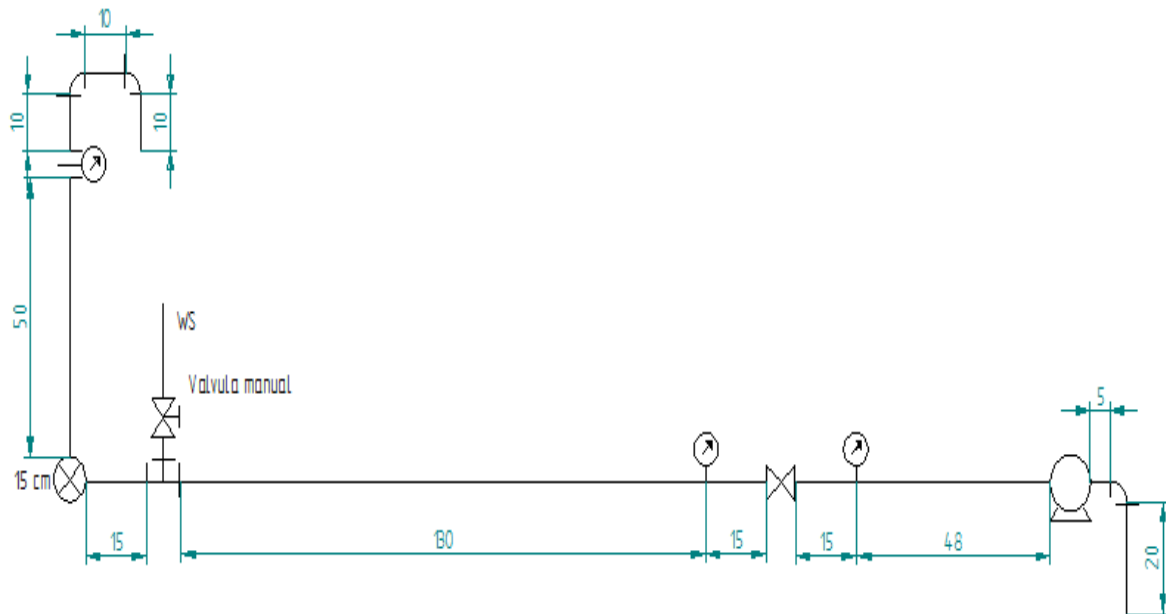
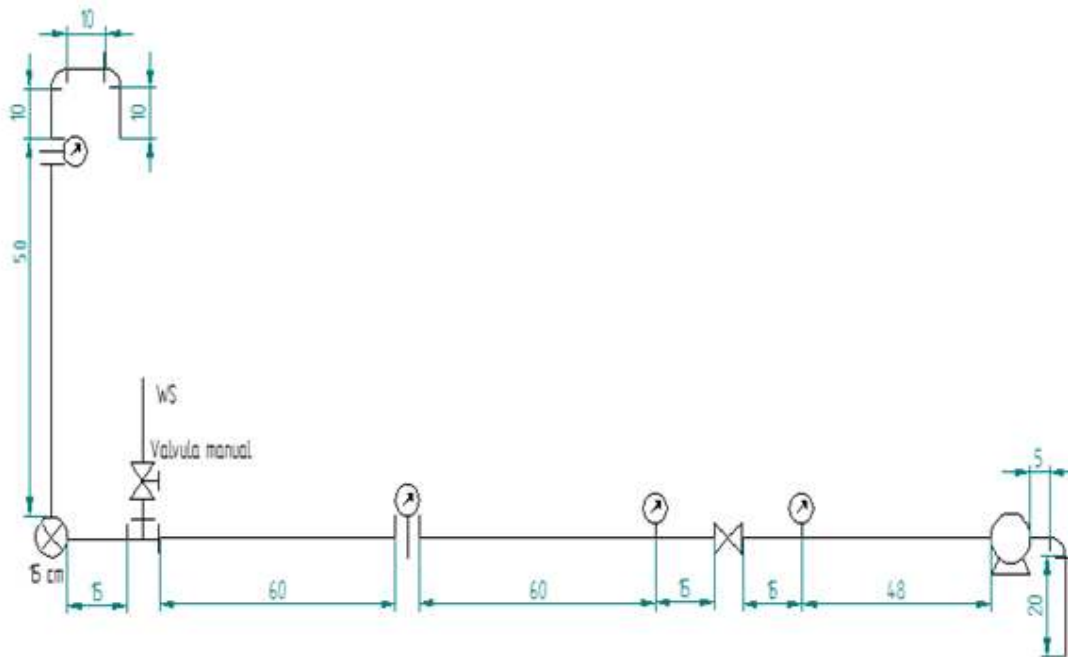


Figura 29. Sistema nuevo (Medidas en centímetros)



**2.4.3.1. Aforo sistema actual:** En la Tabla 13 se muestran los resultados de las mediciones realizadas en el sistema actual.

Tabla 13. Aforo sistema actual

Flujo		Presión de entrada		
l/h	m <sup>3</sup> /s	kg/s	KPa	psi
854,86	0,000237	0,237	34,65	5
809,095	0,000225	0,225	36,61	5,3
520,82	0,000145	0,145	56,88	8,3
186,8	0,000052	0,052	158,58	23

Con estos datos y con el plano de tuberías se puede proceder a realizar el análisis de flujo correspondiente, en el siguiente capítulo.

### 3. DISEÑO BÁSICO

En este capítulo se presenta el resultado de la selección de la instrumentación y el diseño básico del sistema mecánico, es decir cálculos de pérdidas en tuberías, diseño de los tanques, selección del material y el diseño de la estructura. Para la selección de la instrumentación se plantean las alternativas de solución, seleccionando los elementos necesarios según las cotizaciones realizadas a diferentes proveedores, según las necesidades del proyecto.

#### 3.1. INSTRUMENTACIÓN

Utilizando los resultados de la sección 2.3.2. Selección de la instrumentación, se inicia la búsqueda de proveedores y la selección la propuesta más adecuada.

**3.1.1. Proveedores:** En este punto se busca generar una base de datos de cuáles son los posibles proveedores para la instrumentación, los datos recopilados de los posibles proveedores se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Proveedores

Proveedor	Dirección	Teléfono	Correo electrónico
Instrumentos & controles S.A.	cr86 a 43-59	2523614	
Multicontrol	dg75 b 8-40 of 310	4961550	bogota@multicontrol.com.co
Surti industria Ltda.	cr33 38 a s-46 envigado	2606632	surtiindustria@une.net.co;
Festo Ltda.	cll 80 a 32 ee-54	4112691	ventas.colombia@co.festo.com
Comtitronic S.A.	cll 6 sur 52-18 p-2 c.c. el rodeo	3515475	ventas2@comtitronic.com
Medición y control	cll 11 c s 48 b-06	3164600	
Automatización S.A.	cr44 57 s-67 sabaneta	3786600	medellin@automatizacion.com.co
Coldecon Ltda.	cll 7 s 51 a-21 int 172 p-3	3615577	info@coldecon.com.co
Intercol S.A.	cr 64 a no. 39-42	316 33 22	comercial@intecol.com.co
Micro	cr 52 no. 14-30 local 108	444 3811	ventas2@micro.com.co
Master controls	cll 48c no. 66-07 of.206	434 2896	medellin@master-controls.com
Suconel	cr 53 no. 50-51 locales 207-208	4487830	suconel@suconel.com
Equipel Ltda.	calle 30b n° 71 - 47 belén	444-94-35	contacto@equipelLtda.com
GIC ingeniería	Medellín	4512199	natalia.ruiz@gicingenieria.com

Cada uno de estos proveedores fue buscado en la ciudad de Medellín, con el objetivo de poder realizar visitas al laboratorio e involucrar mas a los proveedores en el proyecto, generando una mayor claridad en los conceptos para cotizar los equipos necesarios y además obtener recomendaciones que puedan aportar al desarrollo del proyecto.

**3.1.2. Cotizaciones:** A cada uno de estos proveedores se le solicitó una cotización con los equipos mostrados en la Tabla 15.

Tabla 15. Elementos cotizados

Instrumentación			
Instrumento	Rango	Características	Cantidad
Válvula mas Posicionador	Flujo de 18 L/min	Válvula de Globo, posicionador neumático, conexión a proceso de 1", si es posible bridada y presión de entrada es de 23 psi	1
Transmisor de nivel	Entrada máximo 2 bar/Salida:3-15 psig	-	2
Convertidores P/I	Entrada: 3-15 psi, Salida: 4-20 mA CD	-	3
Reguladores de presión	Salida: 0-30 psi	-	2
Manómetro	30 psi (2 bar)	caratula de 2 1/2", vertical, con glicerina	1
Manómetro	15 psi (1 bar)	caratula de 2 1/2", vertical, con glicerina	2
PLC	Como mínimo 3 entradas análogas y 4 salidas análogas.	Protocolo Ethernet	1
Flujometro de turbina	Flujo de 18 L/min	Presión de entrada 23 psi	1
Bomba, motor(trifásico) y Variador	Cabeza: 20 PSI, Flujo: 18 L/min	Motor trifásico, CENTRÍFUGA, variador según la potencia de la bomba	1
Fuente de voltaje	120/230 VAC, salida 24VDC, 2.5 A	-	1

Se esperó respuesta de cada uno los proveedores consultados pero no todos responden como se espera o responden de forma incompleta, en la Tabla 16 se muestra que proveedor respondió y que equipos cotizó.

Tabla 16. Posibles proveedores

Proveedor	Válvula	Transmisor	Convertidor P/I	Regulador de presión	PLC	Medidor de Flujo	Bomba	Variador	Fuente
Surti industria		x		x		x			
Comitronic	x								
Automatización	x								
Coldecon		x			x				
Instruequipos	x	x		x	x	x	x		
Master controls	x	x			x	x	x	x	x
GIC ingeniería	x	x	x		x	x	x	x	x
Multicontrol					x			x	

**3.1.3. Selección de la instrumentación:** Según la Tabla 16 que contiene los posibles proveedores para cada uno de los equipos del sistema, se seleccionará por medio de matrices de decisión la mejor propuesta de cada equipo.

En cada una de las tablas de selección se utilizó como convención las siguientes siglas:

- V: Valor: Dato teórico, lo da el proveedor del equipo.
- C: Calificación: Es valor numérico de la característica que se esta evaluando, tomando como referencia el mejor valor presentado por los proveedores.

Para realizar el cálculo del resultado final se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 6. Selección de instrumentación

$$\sum \text{Ponderado} * \text{Calificación}. \quad (6)$$

Para facilidad del lector se resalta la opción seleccionada con color amarillo.

**3.1.3.1. Válvula:** En la Tabla 17 se muestran los resultados de la evaluación de la propuesta de cada proveedor.

Tabla 17. Selección de instrumentación (Válvula)

Proveedor	Válvula										
	Costo (40%)		Posicionador y convertidor (20%)		Conexión a proceso Ideal: Bridada (20%)		Requiere elementos extras (10%)		Tiempo de entrega (10%)		Total
	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	
Comtitronic	8.871.000	2	No	1	Si	5	Si	1	Inmediato	5	2,6
Automatización	11.060.000	2	No	1	No	1	Si	1	16-18 semanas	1	1,4
Instruequipos	4.375.000	5	Si	5	Si	5	No	5	4 semanas	4	4,9
Master	4.500.000	5	Si	5	Si	5	No	5	6 a 7 semanas	3	4,8
GIC	5.320.000	4	Si	5	No	1	No	5	Inmediato	5	3,8

Como se observa en la Tabla 17 la mejor propuesta fue presentada por Instruequipos con un ponderado de 4,9.

**3.1.3.2. Transmisor:** En la Tabla 18 se muestran los resultados de la evaluación de la propuesta de cada proveedor.

Tabla 18. Selección de instrumentación (Transmisor)

Proveedor	Transmisor de presión				
	Costo (70%)		Rango: 0-2 bar (30%)		Total
	V	C	V	C	
Surti industria	453.000	4	0-1 bar	3	3,7
Coldecon	654.000	3	0-2 bar	5	3,6
Instruequipos	388.512	5	0-2 bar	5	5
Master controls	837.200	2	0-2,5 bar	4	2,6
GIC ingeniería	600.000	3	0-25 bar	1	2,4

Según la Tabla 18 la mejor propuesta es la de Instruequipos con un ponderado de cinco.

**3.1.3.3. Convertidor P/I:** En la Tabla 19 se muestran los resultados de la evaluación de la propuesta de cada proveedor.

Tabla 19. Selección de la instrumentación (Convertidor)

Convertidor I/P*	
Proveedor	Costo (\$)
GIC ingeniería	1.180.000,00

\*Con la válvula seleccionada no es necesario este ítem

Por ser única propuesta es la opción seleccionada.

**3.1.3.4. Regulador de presión:** En la Tabla 20 se muestran los resultados de la evaluación de la propuesta de cada proveedor.

Tabla 20. Selección de la instrumentación (Regulador de presión)

Proveedor	Regulador				Total
	Costo (70%)		Rango (30%)		
	V	C	V	C	
Surti industria	95.000	3	N/A	1	2,4
Instruequipos	55.000	5	0-150 psi	5	5

Según la Tabla 20 la propuesta seleccionada es la de instruequipos con un ponderado de 5.

**3.1.3.5. PLC:** En la Tabla 21 se muestran los resultados de la evaluación de la propuesta de cada proveedor.



Tabla 21. Selección de la instrumentación (PLC)

PLC													
Proveedor	Costo (30%)		Entradas análogas (20%)		Salidas análogas (20%)		Requiere módulos de expansión y pantalla (10%)		Utilidades [Pantalla] (15%)		Tiempo de entrega (5%)		Total
	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	
Coldecón (1)	2.679.200	5	4	3	4	5	No	5	Si (Monocromática)	1	45 días	3	3,9
Coldecón (2)	4.508.400	3	4	3	4	5	No	5	Si (Policromática)	5	Inmediata	5	4
Coldecón (3)	5.502.900	2	4	3	4	5	No	5	Si (Policromática)	5	Inmediata	5	3,7
Máster controls	6996000	2	4	3	4	5	Si	1	Si (Monocromática)	1	45 días	3	2,6
GIC ingeniería	5606000	2	6	5	4	5	Si	1	Si (Policromática)	5	Inmediata	5	3,7

Según la Tabla 21 la propuesta seleccionada es la segunda propuesta de Coldecon es el PLC Unitronics V570-57-T40B con un ponderado de 4.

**3.1.3.6. Medidor de flujo:** En la Tabla 22 se muestran los resultados de la evaluación de la propuesta de cada proveedor.

Tabla 22. Selección de la instrumentación (Medidor de flujo)

Medidor de flujo													
Proveedores	Costo (25%)		Flujo Ideal: 30 L/min (20%)		Salida (Pulsos o 4-20 mA) (15%)		Conexión a proceso Ideal (1") (10%)		Utilidades (indicación local) (10%)		Principio de funcionamiento (20%)		Total
	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	
GIC ingeniería(1)	2.204.800	2	3-50 L/min	5	4-20 mA	5	1"	5	Si	5	Magnético	5	4,25
GIC ingeniería(2)	1.830.000	3	3-50 L/min	5	Pulsos	1	1"	5	No	1	Turbina	1	2,7
Master	1.092.000	5	2-40 L/min	4	Pulsos	1	3/4"	1	No	1	Turbina	1	2,6

Según la Tabla 22 el medidor de flujo seleccionado es la propuesta 1 de GIC.

**3.1.3.7. Bomba más variador de velocidad:** En la Tabla 23 se muestran los resultados de la evaluación de la propuesta de cada proveedor.

Tabla 23. Selección de la instrumentación (Bomba con variador de velocidad)

Bomba											
Proveedor	Potencia Ideal: 1/2 HP (20%)		Caudal Actual: 18 L/min (20%)		Variador (20%)		Costo (Bomba más variador) (25%)		Descarga Actual: 1" (15%)		Total
	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	
Master	1 HP	3	30 L/min	3	Si	5	1.160.000	4	1"	5	3,95
GIC Ingeniería	1 HP	3	200 L/min (53 gpm)	1	Si	5	990.000	5	1 1/4"	4	3,65
Instruequipos	1/2 HP	5	50L/min	2	No	1	2.562.500	1	1"	5	2,6

Según la Tabla 23 la propuesta más adecuada es la de Master.

**3.1.3.8. Fuente:** En la Tabla 24 se muestran los resultados de la evaluación de la propuesta de cada proveedor. Esta fuente es necesaria para la alimentación de diferentes equipos del sistema.

Tabla 24. Selección de instrumentación (Fuente)

Fuente			
Proveedor	Costo (100%)		Total
	V	C	
Master	539.000	3	3
GIC ingeniería	391.600	5	5

Según la Tabla 24 la propuesta seleccionada es la de GIC.

**3.1.3.9. Manómetros:** En la Tabla 25 y Tabla 26 se muestran los resultados de la evaluación de la propuesta de cada proveedor. Se decide cotizar la misma clase de manómetros que posee el sistema actual. Se debe mencionar que todos

los manómetros son de la misma resolución solicitada al proveedor y son con glicerina para evitar las malas lecturas por vibraciones en el sistema.

Tabla 25. Selección de la instrumentación (Manómetro de 0-30 psi)

Manómetro (0-30 psi)					
Proveedor	Costo (70%)		Recalibrable (30%)		Total
	V	C	V	C	
Surti industria	65.000	2	No	1	1,7
Comitronic	128.800	1	No	1	1
Coldecon	48.190	3	No	1	2,4
Instruequipos	31.800	5	No	1	3,8
GIC ingeniería	170.000	1	Si	5	2,2

Tabla 26. Selección de la instrumentación (Manómetro de 0-15 psi)

Manómetro (0-15 psi)					
Proveedor	Costo (70%)		Recalibrable (30%)		Total
	V	C	V	C	
Comitronic	128.800	1	No	1	1
Coldecon	48.190	3	No	1	2,4
Instruequipos	31.800	5	No	1	3,8
GIC ingeniería	170.000	1	Si	5	2,2

Según la Tabla 25 y Tabla 26 la propuesta más adecuada es la de Instruequipos.

### 3.2. DISEÑO MECÁNICO BÁSICO

En este apartado se definirán las características de diseño y se presentarán los resultados del diseño de la nueva red de tuberías, por medio de *Pipe Flow Expert*.

**3.2.1. Red de tuberías:** En la Figura 29 se aprecia la configuración del sistema en el programa, además de esto, en la Tabla 13, se observan las Condiciones con las que se trabajó la simulación de flujo, se debe de mencionar que al análisis se realizó con la máxima apertura de la válvula de control.

Antes de realizar la simulación el sistema requiere los siguientes datos:

- Montar el sistema completo (dimensiones, accesorios con sus características inherentes y materiales)
- Como datos extras si no se tiene la curva de la bomba este la pude replicar por medio de datos como el flujo y la cabeza (datos obtenidos durante el aforo) como se ven en la Figura 30.

Después de realizar la simulación en *Pipe flow expert* en la Figura 30, Figura 31 y Figura 32, se muestran los valores de la simulación para la bomba y resultados obtenidos del sistema respectivamente.

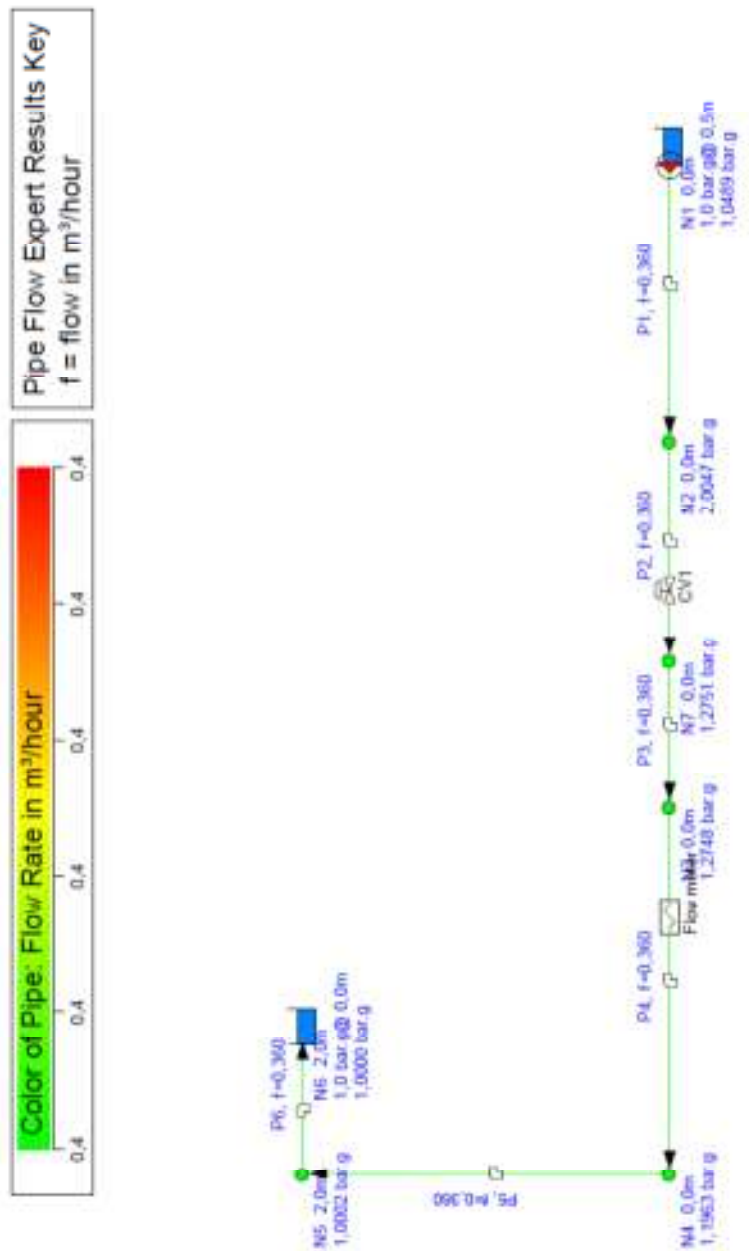
Figura 30. Valores de simulación red de tuberías (Bomba)

Flow	Head
m <sup>3</sup> /hour	m Fluid
0.187	16.203
0.522	5.812
0.810	3.741
0.853	3.540

Los resultados generales se observan en la Figura 31.



Figura 32. Resultados nuevo sistema de red de tuberías



Según los resultados de la simulación todos los nodos tienen presión y el sistema funciona correctamente. Además de lo anterior el sistema mantiene las condiciones de flujo.

Se verifica según las simulaciones del sistema actual y el sistema nuevo y se verifica que todos los nodos tienen presión y un flujo correspondiente, además no muestran zonas en “rojo” donde posiblemente según el sistema podríamos tener problemas de flujo o restricciones que puedan afectar el desempeño, en definitiva la simulación arroja datos exitosos.

**3.2.2. Tanques:** De los resultados obtenidos en la selección por el método de convergencia controlada y apoyado por los resultados del análisis de carga, el material seleccionado es el PMMA, ya que la diferencia en costo no es significativa y proporciona mejores propiedades que el PS cristal.

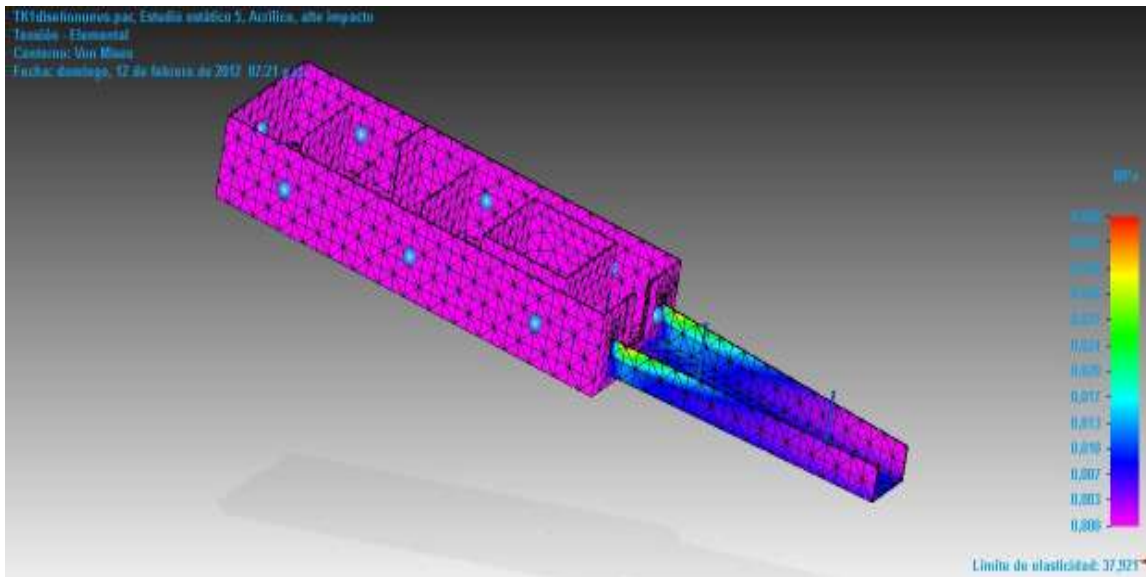
Las restricciones de diseño son las siguientes:

- Mantener mismo diseño de los tanques (área y forma).
- Alargar más el tiempo muerto del Tk1.
- Nuevo sistema de sujeción de los vertederos.

Además de lo anterior, se realizan orificios de  $\frac{1}{4}$ " en cada tanque para permitir su sujeción a la estructura por medio de tonillos comerciales para facilitar su mantenimiento.

En la Figura 33 se muestra la simulación de esfuerzos para el canal diseñado para el Tk1, demostrando que no falla bajo una carga de 30 Newton, que equivalen a aproximadamente 3 kg.

Figura 33. Prueba de esfuerzos al canal del Tk1



En la Figura 34 y la Figura 35 se muestra cual será la forma final de cada uno de los tanques.

Figura 34. Tk1 rediseñado

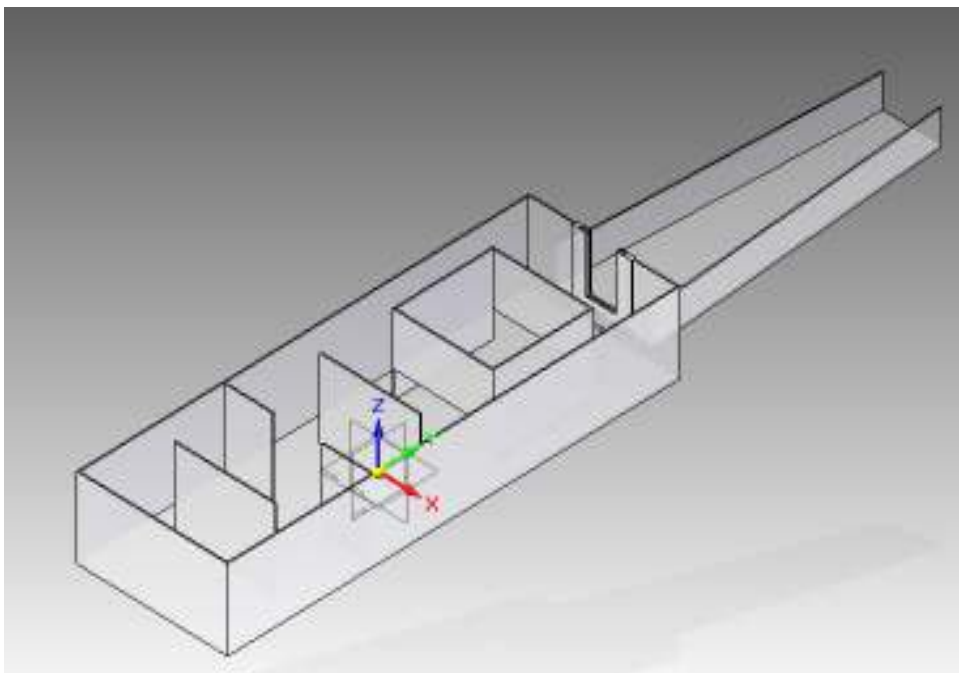
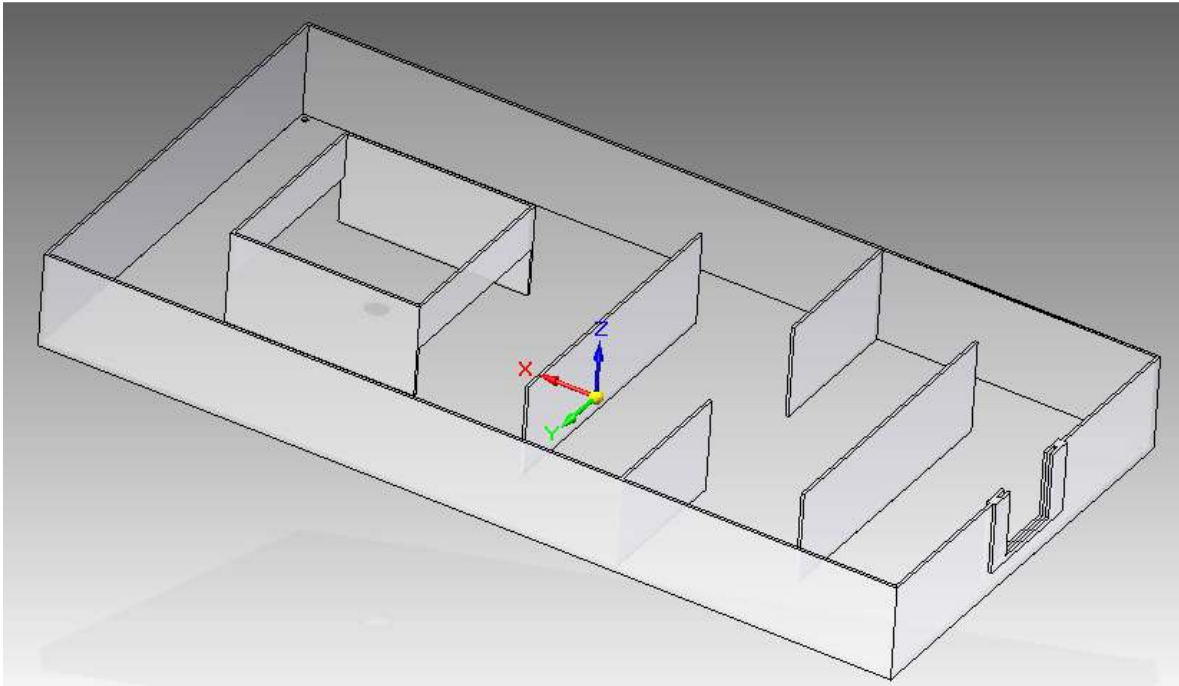




Figura 35. Tk2 rediseñado



**3.2.3. Estructura:** Según los resultados obtenidos las estructuras tienen un excelente comportamiento bajo carga, en este punto se define la forma en que la estructura va a ser empotrada al suelo y de qué manera se van a sujetar los tanques a la estructura, como se ve en la Figura 36 y Figura 37.

Figura 36. Estructura Tk1

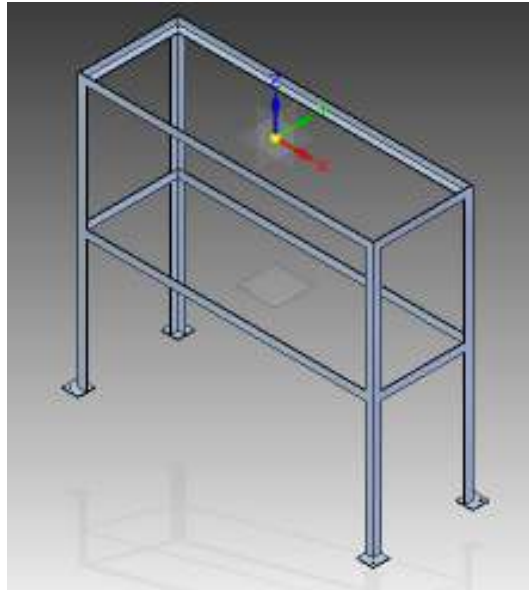
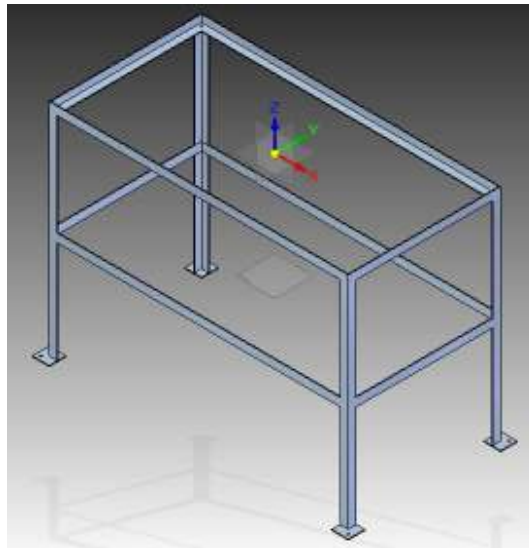


Figura 37. Estructura Tk2



**3.2.4. Cotización elementos mecánicos:** Según los planos de cada uno de los tanques y de las estructuras, se envían correos a los proveedores mencionados en la Tabla 27.

Tabla 27. Cotización elementos mecánicos

Proveedor	Dirección	Teléfono	Correo electrónico	Contacto
Inversiones Superior LTDA.	Cr46 39-63	31279341908	acarvajal@isuperior.co	Alfonso Carvajal
Metálicas PER	Cl 135 S 54-19 Caldas	2787195	metalicasper@une.net.co	Juan Pablo
Taller cartama	CR 45 #28 07	4480773	Tcartama@une.net.co	Rubén Darío Cardona

Los planos de estos elementos se encuentran en el Anexo D.

**3.2.4.1. Estructuras:** Se obtiene respuesta de Inversiones superior LTDA., los resultados de las cotizaciones se observan en la Tabla 28.

Tabla 28. Cotización de estructura

Elemento	Proveedor	Costo	Comentarios
Estructuras	Inversiones superior LTDA.	1500000	Incluye estructura Tk1 yTk2.

Inversiones superior LTDA, fue el único proveedor que contestó. Se selecciona esta cotización para realizar el presupuesto del proyecto con este valor.

**3.2.4.2. Tanques:** De las cotizaciones enviadas ninguno de los proveedores contestaron, se toma como decisión cotizar con un proveedor más pequeño por medio de una visita a su local y se obtiene la cotización mencionada en la Tabla 29.

Tabla 29. Cotización tanques

Tanque	Proveedor	Comentarios	Costo	Contacto	Fecha
Tk1	Inversiones superior LTDA.	Se trata el tema de la Alfonso Carvajal que es un asesor de Inversiones superior, ya que son	900000	Alfonso Carvajal	22/10/11
Tk2	Inversiones superior LTDA.	trabajos no comerciales y no es común que ellos trabajen con polímeros (PMMA), el brinda un estimado en precio para los tanques.	800000	Alfonso Carvajal	22/10/11

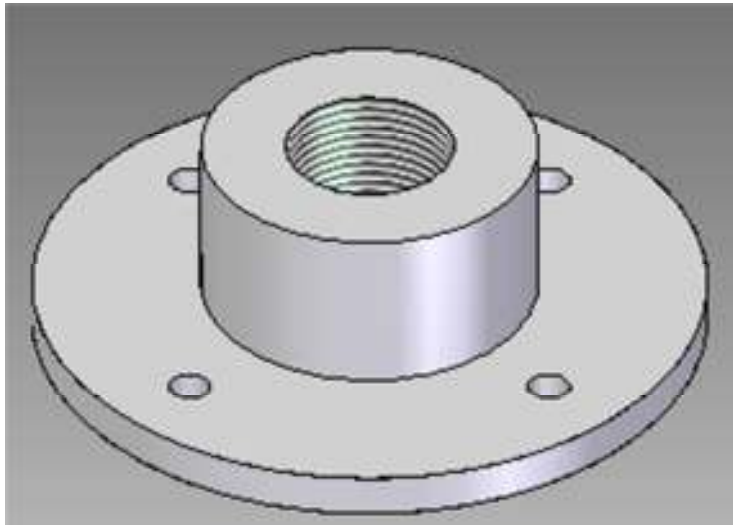
Dentro de esta cotización se encuentra la fabricación del canal para el Tk1.

**3.2.4.3. Piezas complementarias:** En la Figura 38 se muestra la pieza complementaria, no comercial, necesaria para realizar el montaje del sistema de tanques en cascada. Esta pieza es el acople entre el transmisor de presión tipo tabaco y los tanques, en la Tabla 27 Se indica los proveedores a los cuales se les envió el plano 09 (Acople tanque-medidor de presión).

Se resivieron algunas ecomendaciondes por parte de Inversiones superior como:

- Material: Acero inoxidable.
- Se recomienda que en el uso de los acoples se monte un empaque de viton, por razones de durabilidad y efectividad en el funcionamiento.

Figura 38. Acople tanque-medidor de presión



En la Tabla 30 se muestran los resultados de las cotizaciones.

Tabla 30. Cotización acople tanque-medidor de presión

Elemento	Proveedor	Costo	Comentarios
Acople tanque-transmisor de presión	Inversiones superior LTDA.	60000	Es el costo unitario, el proveedor propone acero inoxidable según la aplicación.

Inversiones superior LTDA, fue el único proveedor que contestó. Se selecciona esta cotización para realizar el presupuesto del proyecto con este valor.

## **4. DISEÑO DE DETALLE**

En este capítulo se presenta la configuración final de cada propuesta, con tabla de costo y además los costos adicionales por el montaje. Además de esto, se presentan las recomendaciones que se deben tener en cuenta a la hora del montaje del proyecto.

### **4.1. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA**

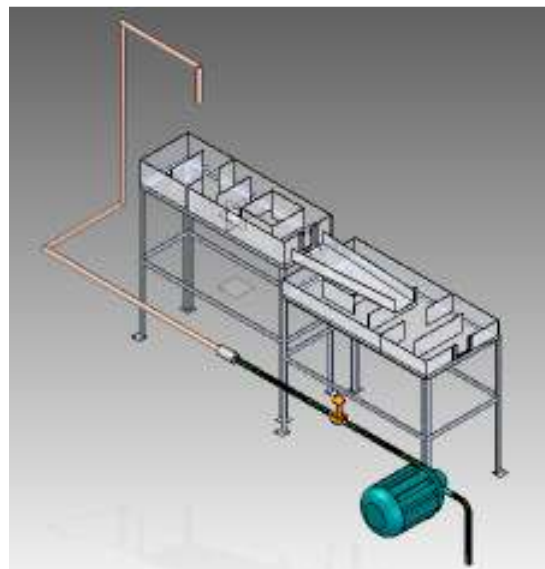
Luego de todos los estudios realizados, el sistema de tanques queda conformado por los elementos que se ven en la Tabla 31 de forma detallada. Adicionalmente se presenta cuáles de éstos pueden ser reutilizados del sistema actual y cuales deben de ser reemplazados.

Tabla 31. Elementos del sistema de tanques

Elemento	Cantidad	Puede ser reutilizado
Estructura	2	Si
Tanques	3	Si
Válvula de control	1	No
Posicionador neumático	1	No
Manómetro 1 Bar	2	Si
Manómetro 2 Bar	2	Si
Flujometro de turbina	1	No existe en el sistema actual
Rotámetro	1	Si
Transmisor de presión	2	No existe en el sistema actual
Regulador de presión	2	No
Convertidor	1	No
PLC	1	No existe en el sistema actual
Controlador	1	Si
Bomba centrífuga	1	No
Variador de velocidad	1	No existe en el sistema actual
Fuente	1	No existe en el sistema actual

En la Figura 39 se observa de forma esquemática la configuración de elementos mecánicos del sistema.

Figura 39. Esquema final del sistema



## 4.2. INSTRUMENTACIÓN

En esta parte del proyecto se presenta la instrumentación seleccionada, propuestas de instrumentación y el costo para cada propuesta sin incluir el montaje.

**4.2.1. Instrumentación seleccionada:** En la Tabla 32 se muestra toda la instrumentación que fue seleccionada en el capítulo anterior

Tabla 32. Costo instrumentación seleccionada (Propuesta C)

Instrumento	Proveedor	Cantidad	Costo	Costo total
Válvula	Instruequipos	1	\$ 4.375.000	\$ 4.375.000
Transmisor	Instruequipos	2	\$ 388.512	\$ 777.024
Regulador de presión	Instruequipos	1	\$ 55.000	\$ 55.000
PLC	Coldecón (2)	1	\$ 4.508.400	\$ 4.508.400
Medidor de flujo	GIC ingeniería(1)	1	\$ 2.204.800	\$ 2.204.800
Bomba con variador de velocidad	Master	1	\$ 1.160.000	\$ 1.160.000
Fuente	GIC ingeniería	1	\$ 391.600	\$ 391.600
Manómetro (0-30 psi)	Instruequipos	1	\$ 31.800	\$ 31.800
Manómetro (0-15 psi)	Instruequipos	2	\$ 31.800	\$ 63.600
			<b>Total</b>	<b>\$ 13.567.224</b>

En el Anexo C se pueden consultar los catálogos de los artículos seleccionados.



A lo anterior se debe sumar los costos de montaje e implementos como tuberías, codos, cableado, etc. En la Tabla 33 se muestran los costos aproximados de montaje.

Tabla 33. Costo del montaje

Proveedor	Actividad	Costo
GIC	Montaje de instrumentación	\$ 600.000
GIC	Montaje de tuberías y accesorios	\$ 800.000
GIC	Montaje de tablero de control y potencia	\$ 3.200.000
<b>Total</b>		<b>\$ 4.600.000</b>

Más detalles se pueden ver en la cotización de GIC en el Anexo C.

Se debe tener en cuenta que alguna de la instrumentación del sistema actual se puede reutilizar y disminuir los costos de implementación, los instrumentos reutilizables se muestran en la Tabla 34.

Tabla 34. Instrumentos reutilizables

Instrumento	Proveedor	Cantidad	Costo	Costo total
Manómetro (0-30 psi)	Instruequipos	1	\$ 31.800	\$ 31.800
Manómetro (0-15 psi)	Instruequipos	2	\$ 31.800	\$ 63.600
<b>Total</b>				<b>\$ 95.400</b>

**4.2.2. Conexiones eléctricas:** Las conexiones eléctricas están incluidas dentro de la cotización del montaje, para garantizar un correcto funcionamiento del sistema es necesario cotizar un tablero de control y potencia con botón de paro de emergencia, esto se encuentra incluido dentro de la cotización realizada por GIC.

### 4.3. MONTAJE, ESTRUCTURAS Y TANQUES

Se presentarán los costos del proyecto con respecto a montaje, costo de fabricación de elementos que sean necesarios para el montaje, estructuras y los tanques. En la Tabla 33 se muestran los costos aproximados del montaje, el costo de los tanques, los cuales se estima mediante las horas de trabajo del proveedor y el material. En la Tabla 35 se muestran los costos de los tanques y la estructura.

Tabla 35. Costos de montaje e implementación del tablero de control

Ítem	Descripción	Valor unitario
1	Montaje de los instrumentos. Incluye montaje de la motobomba, válvula de control, 2 transmisores de presión, convertidor I/P, válvula de cierre rápido, 2 manómetros y medidor de flujo. (no incluye los equipos)	\$ 600.000,00
2	Montaje de tubería y accesorios. Incluye el suministro y montaje de 5 metros de tubería de 1", accesorios como mangueras, codos, tees, uniones, bridas, soldaduras y fijadores. Adicional el desmontaje de todo el sistema actual.	\$ 800.000,00
3	Montaje del tablero de control y potencia. Incluye tablero en lamina cold rolled ubicado a máximo tres metros de la máquina, protecciones termo magnéticas, montaje del PLC, montaje de la fuente, montaje de la pantalla táctil y accesorios como borneras, relés, riel omega, pulsadores, alarma audible y visual, marcaciones y cableado hasta borneras y planos. Cableado en campo con sus respectivas marcaciones, sistemas de transporte como tubería conduit, cajas de paso, etc.	\$ 3.200.000,00
<b>Total</b>		<b>\$ 4.600.000,00</b>

Para el montaje mecánico del sistema de tanques es necesario tener los elementos de la Tabla 36. Lo anterior está sujeto a cambios durante el montaje, ya que la propuesta es aproximada a lo que se requiere utilizar y esto ya está incluido en la cotización realizada por GIC ingeniería.

Tabla 36. Listado de piezas para el montaje

Pieza	Cantidad	Unidad de medida
Tubería de 1"	5	m
Codos de 90 grados	10	Unidades
Tee de 1"	5	Unidades
Brida para la conexión de la válvula de control	4	Unidades
Pieza para el ensamble del transmisor de presión con los tanques	2	Unidades
Tornillo de 1/8" Cabeza hexagonal de 1/2"	12	Unidades
Tornillo de 1/4" Cabeza hexagonal de 1"	12	Unidades
Viton para fabricar empaques	2	m <sup>2</sup>

Estos elementos están sujetos a cambios en cantidades, durante el montaje dependiendo de las necesidades que se presentan durante este.

Toda la tornillería se utiliza para el ensamble de los tanques y la estructura, y para el ensamble entre el tanque y los transmisores de presión, aparte de todas las necesidades que se presenten durante el desarrollo del proyecto.

#### 4.4. PROPUESTAS DE REDISEÑO

Las propuestas de rediseño son principalmente dos, las cuales consisten en tener una propuesta con todo el laboratorio nuevo, es decir: tanques, estructura, toda la instrumentación, variador de velocidad, PLC y únicamente reutilizando el controlador PID que se encuentra en el laboratorio.

**4.4.1. Estrategia 1:** En la Tabla 37 se muestra todos los elementos y requerimientos para montar un sistema completamente nuevo, con su respectivo costo por ítem y costo total.

Tabla 37. Propuesta 1 (Implementación)

Instrumento	Proveedor	Cantidad	Costo	Costo total
Válvula + posicionador	Instruequipos	1	\$ 4.375.000	\$ 4.375.000
Transmisor de nivel	Instruequipos	2	\$ 388.512	\$ 777.024
Regulador de presión	Instruequipos	1	\$ 55.000	\$ 55.000
PLC	Coldecón (2)	1	\$ 4.508.400	\$ 4.508.400
Medidor de flujo	GIC ingeniería(1)	1	\$ 2.204.800	\$ 2.204.800
Bomba con variador de velocidad	Master	1	\$ 1.160.000	\$ 1.160.000
Fuente	GIC ingeniería	1	\$ 391.600	\$ 391.600
Manómetro (0-30 psi)	Instruequipos	1	\$ 31.800	\$ 31.800
Manómetro (0-15 psi)	Instruequipos	2	\$ 31.800	\$ 63.600
Estructura	Inversiones superior	1	\$ 1.500.000	\$ 1.500.000
TK1	Inversiones superior	1	\$ 900.000	\$ 800.000
TK2	Inversiones superior	1	\$ 800.000	\$ 800.000
Montaje	GIC ingeniería	1	\$ 4.600.000	\$ 4.600.000
			<b>Total</b>	<b>\$ 21.267.224</b>

**4.4.2. Estrategia 2:** En la Tabla 38 se muestran todos los elementos y requerimientos para montar el sistema reutilizando elementos como tanques, estructura, controlador, manómetros, rotámetro.

Tabla 38. Propuesta 2 (instrumentación)

<b>Instrumento</b>	<b>Proveedor</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Costo total</b>
Válvula + posicionador	Instruequipos	1	\$ 4.375.000	\$ 4.375.000
Transmisor de nivel	Instruequipos	2	\$ 388.512	\$ 777.024
Regulador de presión	Instruequipos	1	\$ 55.000	\$ 55.000
PLC	Coldecón (2)	1	\$ 4.508.400	\$ 4.508.400
Medidor de flujo	GIC ingeniería(1)	1	\$ 2.204.800	\$ 2.204.800
Bomba con variador de velocidad	Master	1	\$ 1.160.000	\$ 1.160.000
Fuente	GIC ingeniería	1	\$ 391.600	\$ 391.600
Montaje	GIC ingeniería	1	\$ 4.600.000	\$ 4.600.000
			<b>Total</b>	<b>\$ 18.071.824</b>

#### 4.5. RECOMENDACIONES

Para realizar un buen rediseño y concluir de forma exitosa, se recomienda implementar como mínimo los cambios mencionados en la segunda propuesta. Así el sistema mantendrá las condiciones actuales de operación y permitirá la implementación de una amplia gama de controles. Adicionalmente se agrega valor a las prácticas tanto de pregrado, como de posgrado.

Si por temas presupuestales no se puede implementar ninguna de las dos propuestas, al menos se recomienda cambiar el sistema de red de tuberías, la bomba y la válvula de control, ya que están obsoletos y no funcionan de forma correcta, afectando así los resultados de las prácticas realizadas en el laboratorio.

Se recomienda a la hora de implementar el sistema, volver a cotizar con los proveedores seleccionados, los instrumentos que se vayan a comprar, ya que por el paso del tiempo este valor pudo haber cambiado.

## 5. CONCLUSIONES

Se realizó la identificación del sistema actual, de una forma detallada, cada una de las oportunidades de mejora que tiene el proceso y además de esto, se detectaron unas necesidades extras que le pueden dar un mayor valor agregado al sistema.

Se seleccionó la instrumentación, para esto fue necesario tener muy claro cuáles son las necesidades que tiene el proceso actualmente y cuáles son las necesidades a futuro; para así presentar alternativas que no se excedan en costos y puedan cumplir con las necesidades actuales y posteriores del sistema.

Al generar alternativas de solución (propuestas de rediseño) se tuvieron en cuenta las necesidades del cliente y las restricciones de diseño que posee el sistema, de esta manera se estableció un balance entre costo y beneficio.

La tecnología que se propone implementar es la que se está usando en la industria y acerca mucho más al estudiante al día a día de un proceso automatizado. También se debe observar la parte del costo total de la implementación, aunque es un proyecto académico y no tiene retorno de inversión, las ganancias son netamente académicas.

Es de resaltar que la relación con los proveedores fue muy variable durante todo el proyecto, ya que cuando se cotiza como estudiante la respuesta fue mínima o nula y cuando se cotiza por medio de una empresa reconocida en el medio como Cristalería Peldar S.A. la respuesta por parte de algunos es casi inmediata y con una atención mucho más personalizada. Se debe aclarar que no todas las

cotizaciones se realizaron por medio de Cristalería Peldar S.A., sólo se tomó este camino cuando fue necesario para culminar el proyecto.

Con la implementación de la estrategia dos se podrá realizar control de tres variables (Nivel Tk1, nivel Tk2 y flujo), además se podría implementar estrategias de control avanzado o digital.



## BIBLIOGRAFÍA

Tecnic suport. (n.d.). Retrieved 2010 28-febrero from <http://www.tecnicsuport.com/fonta/taulesconsulta/bombes1/powerc7.jpg>

Universidad de León. (n.d.). Retrieved 2010 15-febrero from [http://images.google.com.co/imgres?imgurl=http://arvc.umh.es/ceaRsc/doc/Maquet a4tanques.jpg&imgrefurl=http://arvc.umh.es/ceaRsc/&usg=\\_\\_5VNaNN3TjfCxngso WNVjIUtyP8E=&h=1017&w=945&sz=188&hl=es&start=11&um=1&itbs=1&tbnid=G 6Td\\_-8bd8hfIM:&tbnh=150&tbnw=139&prev](http://images.google.com.co/imgres?imgurl=http://arvc.umh.es/ceaRsc/doc/Maquet a4tanques.jpg&imgrefurl=http://arvc.umh.es/ceaRsc/&usg=__5VNaNN3TjfCxngso WNVjIUtyP8E=&h=1017&w=945&sz=188&hl=es&start=11&um=1&itbs=1&tbnid=G 6Td_-8bd8hfIM:&tbnh=150&tbnw=139&prev)

Universidad Iberoamericana, Cd. de México. (n.d.). Retrieved 2010 15-febrero from [http://200.13.98.241/~javier/lab\\_control/labcontrolO07/4TankProb.pdf](http://200.13.98.241/~javier/lab_control/labcontrolO07/4TankProb.pdf)

CHAIN, N. S., & CHAIN, R. S. (1991). Preparacion y evaluacion de proyectos. Mexico df: McGraw-Hill

CRANE, D. d. (1992). Flujo de Fluidos, en válvulas, accesorios y tuberías. McGraw-Hill.

Creus Solé, A. (1997). Instrumentación Industrial. Barcelona: Marcombo.

Dorf, R., & Bishop, R. (2005). Sistemas de control moderno. Madrid: Prentica Hall.

Garcia Rivera, P. (2006). Implementacion y puesta a punto de un sistema de control en cascada. Medellin: UPB.

Mataix, C. (1986). Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidraulicas. Madrid: Ediciones del Castillo S.A.

Montoya, C. (2008 йил julio). (Lab. 1. Fluidos 2) Pérdidas en tuberías y accesorios PÉRDIDAS EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS. Medellin: UPB.



## **ANEXO A. ANTEPROYECTO**

### **Objetivos**

#### **Objetivo general**

Rediseñar el sistema de tanques en cascada ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Pontificia Bolivariana, para realizar prácticas de control de nivel y flujo, de pregrado y posgrado.

#### **Objetivos específicos**

Identificar el proceso a rediseñar, con el fin de aprovechar dichos conocimientos en el rediseño del sistema y definir la instrumentación que puede ser reutilizada.

Determinar las variables involucradas en el proceso, para definir cuales se van a medir y a controlar.

Seleccionar la instrumentación necesaria para implementar nuevas estrategias de medición y lazos de control.

Realizar el diseño detalle del sistema de tanques en cascada, entregando la información necesaria como: planos de instalación y ubicación de la instrumentación seleccionada, y de la reubicación del sistema de tanques en cascada. Para facilitar el proceso de construcción, montaje y puesta a punto en la siguiente fase del proyecto.

Presentar dos propuestas de rediseño, para seleccionar una, ajustándola al presupuesto y a las necesidades del laboratorio.

**Productos esperados**

- Planos de detalle (ensamble y taller)
- Plano de instrumentación
- Memorias de diseño y cálculos relevantes.
- Catálogos y cotizaciones.
- Artículo publicable.

**Alcance**

Este proyecto está enfocado a realizar un rediseño de un sistema de tanques en cascada y para cumplir con este propósito se le dará prioridad a la selección de la instrumentación y al rediseño de la parte mecánica del sistema, garantizando su correcto funcionamiento.

El proyecto no incluirá el diseño de sistemas de control, ya que no se cuenta con los recursos y la instrumentación necesaria para realizar el montaje, pero el sistema si se dejará habilitado con nuevos instrumentos y planos de instalación, para nuevas estrategias de control, como el control no lineal y la implementación de observadores. Tampoco incluirá la construcción mecánica y eléctrica del prototipo, pues esto se hará posteriormente gracias a los productos entregables de este proyecto tales como planos de taller, planos de instrumentación y planos de conexión; finalmente no se supervisará la construcción del nuevo sistema, ni la implementación de nuevas estrategias de control.

## ANEXO B. ELEMENTOS TEÓRICOS COMPLEMENTARIOS

En este anexo se tratarán los temas correspondientes a la teoría que interviene en el rediseño del sistema de tanques en cascada.

### **Variables y señales en un SAC**

Una variable es una magnitud o condición física sometida a cambio en el tiempo, por otro lado una señal es una variable con tres características:

- Se puede transmitir a cierta distancia sin que el valor cambie significativamente.
- Su valor representa de manera codificada una información sobre una variable del proceso.
- Su valor está limitado a un rango estándar.

Toda señal es variable, pero no toda variable puede usarse como señal. A continuación se presentan todas las variables y señales que se involucran en un sistema automático de control<sup>34</sup>.

- Variable finalmente controlada: es aquella que se quiere mantener en un valor predeterminado.
- Variable directamente controlada: es aquella que se mide para fines de control; es función de la variable finalmente controlada.

---

<sup>34</sup> POSADA, Norha Ligia, Ingeniería de control I, introducción a los sistemas automáticos de control (SAC) , notas de clase, (2009); UPB

- Variable manipulada: cambia como función de la señal de actuación, para modificar el valor de la variable directamente controlada.
- Variable perturbadora: variable no deseada aplicada a un sistema y la cual tiende a afectar adversamente el valor de la variable controlada.
- Punto de referencia (*set point*): comando de valor constante.
- Señal retroalimentada: es aquella que informa sobre el valor de la variable controlada.
- Señal de referencia: representa el valor de la variable controlada.
- Señal de error: representa la desviación entre el valor deseado y el valor real de la variable controlada.
- Señal de control: es aquella que representa la decisión con la que se pretende corregir el error.

Por medio de estas variables y señales es que interactúan los elementos que componen un sistema automático de control.

### **Elementos de un sistema automático de control**

Los elementos típicos que conforman un sistema de control son<sup>35</sup>:

- Planta o proceso: éste representa el modelo matemático que relaciona la variable finalmente controlada con la variable manipulada.
- Perturbación: representa la relación entre la variable finalmente controlada y la variable perturbadora. Típicamente, un sistema controlado posee varias perturbaciones, y cada una de ellas afecta de forma particular la variable controlada.
- Controlador: éste se divide a su vez en 3 elementos, el primero es el elemento de entrada de referencia, éste es el encargado de tomar el *set point* y convertirlo al mismo tipo de señal que la señal retroalimentada; el segundo componente es el punto de suma, este se encarga de comprar la

---

<sup>35</sup> POSADA, Norha Ligia, Ingeniería de control I, introducción a los sistemas automáticos de control (SAC) , notas de clase, (2009); UPB

señal de referencia con la señal retroalimentada y obtener una señal de error y el tercero es el elemento lógico de control, es el encargado de aplicar el algoritmo o ley de control sobre la señal de error para producir una señal de control.

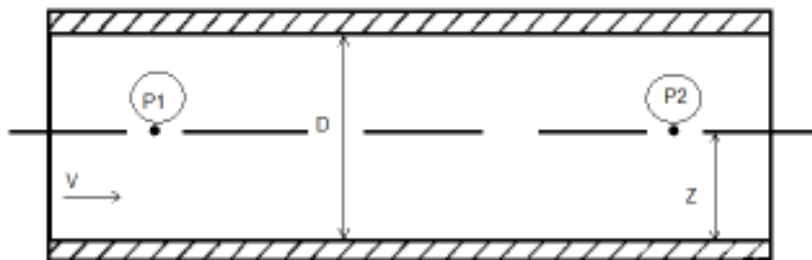
- Elemento final de control: a partir del elemento final de control, ajusta el valor de la variable controlada.

La interconexión de los elementos en un sistema automático de control (SAC), define el tipo de control que se va a realizar, si es el lazo abierto o si es en lazo cerrado.

### Ecuación de *Bernoulli*

El líquido fluye por la tubería del punto 1 (P1) al punto 2 (P2) como se ve en la Figura 40. Para obtener la ecuación de *Bernoulli* se realiza un balance de energía entre P1 y P2, como se muestra a continuación.

Figura 40. Balance de energía para dos puntos de un fluido<sup>36</sup>



Fuente: CLAUDIO MATAIX. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Madrid: Ediciones del Castillo.1986; p204.

<sup>36</sup> CLAUDIO MATAIX. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Madrid: Ediciones del Castillo.1986; p204.

La ecuación modificada de *Bernoulli* para fluidos incompresibles, según CRANE<sup>37</sup> es:

Ecuación 7. Ecuación de *Bernoulli*

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + h_f, \quad (7)$$

dónde,

$v$ : velocidad a la entrada [m/s],

$p_1$ : presión en la entrada [Pa],

$\gamma$ : gravedad específica [kg/(m<sup>2</sup> s<sup>2</sup>)],

$v_2$ : velocidad a la salida [m/s],

$p_2$ : presión en la salida [Pa],

$h_f$ : Pérdidas de cabeza [m].

El número de Reynolds ( $Re$ ) permite conocer el comportamiento del fluido, es decir, si se trata de un flujo laminar o de un flujo turbulento, el cálculo del número de  $Re$  se realiza de la siguiente manera<sup>38</sup>

Ecuación 8. Número de Reynolds

$$Re = \frac{v D \rho}{\mu}, \quad (8)$$

dónde:

---

<sup>37</sup> CRANE, Op. Cit. p6

<sup>38</sup> CRANE, Op. Cit. p5.



$v$ : velocidad media del fluido [m/s],

$D$ : diámetro de la tubería [m],

$\rho$ : densidad del fluido [kg/m<sup>3</sup>],

$\mu$ : viscosidad del fluido [(N s)/m<sup>2</sup>].

El fluido tiene régimen laminar si  $Re$  es menor a 2000, el fluido tiene régimen turbulento si  $Re$  es mayor a 4000 aproximadamente y se encuentra en régimen de transición si  $Re$  está entre 2000 y 4000.

La resistencia al flujo en el régimen laminar, es debida a la viscosidad y cuando el régimen es turbulento, la resistencia es el efecto compuesto por las fuerzas debidas a la viscosidad y a la inercia.

### **Ecuación de *Darcy-Weisbach***

La ecuación de *Darcy-Weisbach* se utiliza para calcular las pérdidas de cabeza en un sistema teniendo en cuenta parámetros como: el Factor de Fricción ( $f$ ), la longitud de la tubería ( $L$ ), diámetro de la tubería ( $D$ ), la velocidad del fluido ( $V$ ) y la Fuerza de gravedad ( $g$ ). Esta ecuación según CRANE<sup>39</sup> es

Ecuación 9. Ecuación de *Darcy-Weisbach*

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}, \quad (9)$$

dónde:

$v$ : velocidad media del fluido [m/s],

$h_f$ : Pérdidas de cabeza en el sistema [m],

---

<sup>39</sup> CRANE, Op. Cit. p7

$f$ : factor de fricción [Adimensional],

$L$ : longitud de la tubería [m],

$D$ : diámetro de la tubería [m],

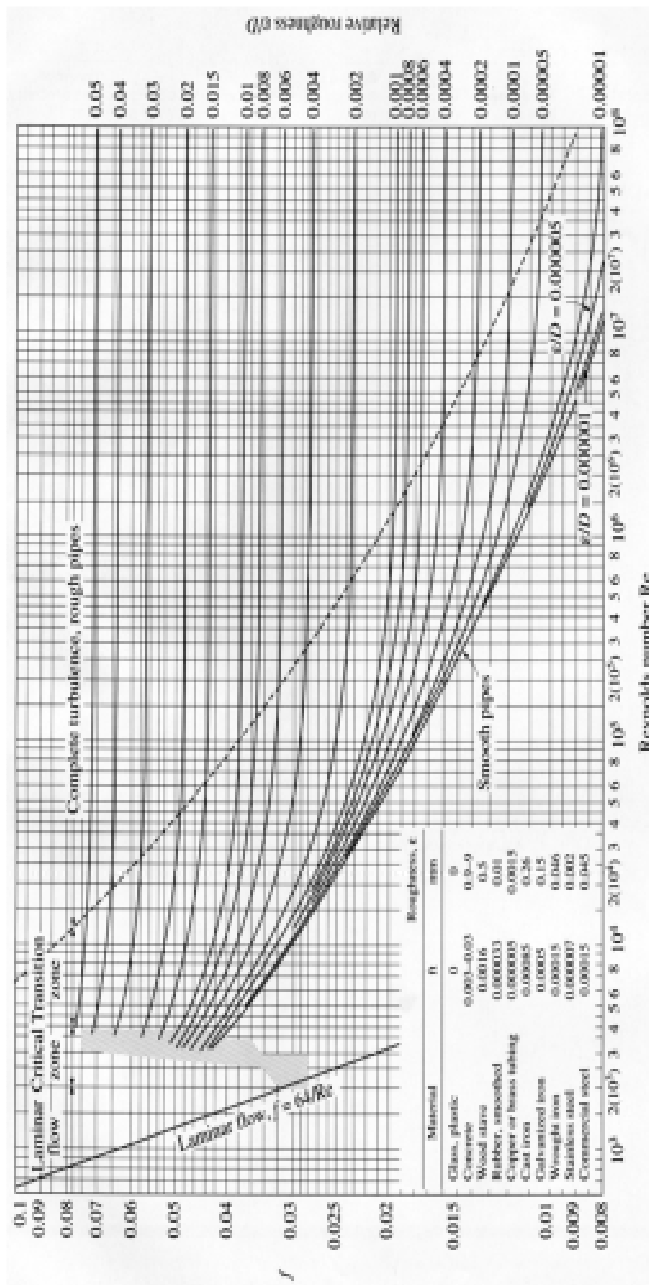
$g$ : fuerza de gravedad [ $\text{m/s}^2$ ].

### **Pérdidas mayores o primarias**

Las Pérdidas mayores o primarias en un flujo incompresible y a régimen permanente por un tubo, se presentan como la pérdida de cabeza ( $h_f$ ) en el sistema, expresadas en las ecuaciones (7) y (9).

El factor de fricción ( $f$ ) se determina experimentalmente de modo que satisfaga la ecuación de *Bernoulli*. Es importante anotar que existen ecuaciones empíricas para el cálculo del factor de fricción en función del  $Re$  y de la rugosidad ( $\epsilon$ ), pero que usualmente se pueden obtener resultados precisos con el diagrama de *Moody* como se ve en la Figura 41.

Figura 41. Diagrama de *Moody*<sup>40</sup>



Fuente: CLAUDIO MATAIX. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Madrid: Ediciones del Castillo.1986; p218.

<sup>40</sup> CLAUDIO MATAIX. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Madrid: Ediciones del Castillo.1986; p218.

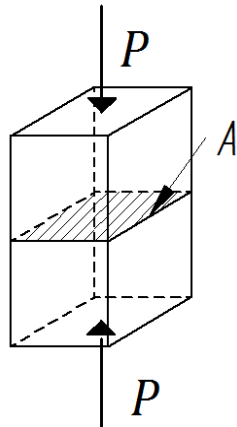
## Esfuerzo normal

Cuando un elemento se encuentra sometido a una carga axial el esfuerzo correspondiente es un esfuerzo normal. Y se define como se ve en la ecuación (6).

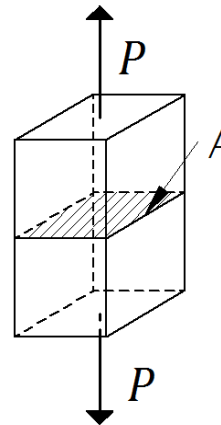
Existen dos tipos de esfuerzos normales. Esfuerzo normal por compresión, este se presenta cuando las fuerzas actúan en sentido opuesto y el esfuerzo normal por tracción, se presenta cuando las fuerzas actúan en dirección opuesta<sup>41</sup>. Como se ve en la Figura 42.

Figura 42. Esfuerzo normal<sup>42</sup>

(a) Esfuerzo normal a compresión



(b) Esfuerzo normal a tensión



Fuente: BEER Ferdinand; Russell Johnston, Mecánica de materiales. Bogotá: McGraw-Hill. 1994; p3.

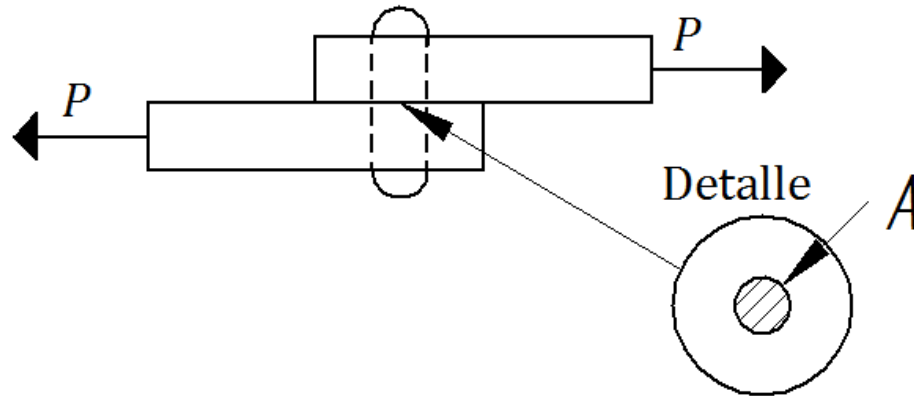
## Esfuerzo cortante

<sup>41</sup> BEER. BEER Ferdinand; Russell Johnston, Mecánica de materiales. Bogotá: McGraw-Hill. 1994; p3.

<sup>42</sup> BEER. Ibid.

Cuando un elemento se encuentra sometido a una carga que incide tangencialmente al área transversal del elemento, el esfuerzo provocado es un esfuerzo cortante<sup>43</sup>, como se ve en la Figura 43.

Figura 43. Esfuerzo cortante<sup>44</sup>



Fuente: BEER Ferdinan; Russell Johnston, Mecánica de materiales. Bogota: McGraw-Hill.1994; p7.

Se define como

Ecuación 10. Esfuerzo cortante

$$\tau = \frac{P}{A}, \quad (10)$$

dónde:

$\tau$ : esfuerzo cortante [Pa],

$P$ : fuerza aplicada o carga [N],

<sup>43</sup> BEER. Op. Cit. p7

<sup>44</sup> BEER. Op. Cit. p7

$A$  : área de la sección transversal [ $m^2$ ].

Éstas son las consideraciones técnicas aparte de las incluidas en el cuerpo del trabajo que deben ser tenidas en cuenta y que aportan al desarrollo de este proyecto.

## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

En este numeral se describirá cada uno de los equipos ya mencionados, con las características técnicas de cada uno.

Se debe mencionar que todos los datos fueron obtenidos por medios investigativos, internet o por los datos de placa, ya que en el laboratorio de operaciones unitarias de la UPB no se cuenta con ningún catálogo de los equipos instalados actualmente, debido a la antigüedad del sistema.

### Convertidor/posicionador

Los datos obtenidos del convertidor/posicionador mostrado en la Figura 7, se obtuvieron por medio de la placa y se muestran en la Tabla 39.

El estado del equipo no es el óptimo, ya que cuenta con algunos errores, tales como histéresis y se recomienda su cambio.

Tabla 39. Convertidor/posicionador

Descripción	
<b>Equipo</b>	Convertidor/posicionador
<b>Marca</b>	Honeywell
<b>Modelo</b>	EP2301-01 9645
<b>Datos de placa</b>	EEx Ib T4/T5/T6:Tumax= 80°C/65°C/50°C 2L: Iw= 4-20mA Ph= 1,5-6 Bar Um= 30 V Imax= 100mA

## Manómetros

El sistema de tanques cuenta con dos tipos de manómetros, para la entrada y la salida de la válvula de control, como se ve en la Tabla 40 y Tabla 41. Adicionalmente éstos cuentan con otro para la indicación de los reguladores de presión como se ve en la Tabla 42 y Tabla 43.

Se recomienda el cambio de los manómetros que están cerca a la bomba ya que ninguno posee glicerina y es esencial para evitar la vibración y poder realizar una lectura de forma correcta.

Tabla 40. Manómetro ubicado en la entrada de la válvula de control

	Descripción
<b>Equipo</b>	Manómetro
<b>Marca</b>	Ashcroft
<b>Rango</b>	0-60 psi
<b>Resolución</b>	0,5 psi
<b>Glicerina</b>	No cuenta con glicerina

Tabla 41. Manómetro ubicado a la salida de la válvula de control

	Descripción
<b>Equipo</b>	Manómetro
<b>Marca</b>	Omega
<b>Rango</b>	0-15 psi
<b>Resolución</b>	0,1 psi
<b>Glicerina</b>	No cuenta con glicerina



Tabla 42. Manómetro de indicación para el regulador de presión

	<b>Descripción</b>
<b>Equipo</b>	Manómetro
<b>Marca</b>	Jhonson Controls
<b>Rango</b>	0-30 psi
<b>Resolución</b>	1 psi
<b>Glicerina</b>	No cuenta con glicerina

Tabla 43. Manómetro de indicación para el regulador de presión

	<b>Descripción</b>
<b>Equipo</b>	Manómetro
<b>Marca</b>	Ashcroft
<b>Rango</b>	0-30 psi
<b>Resolución</b>	0,5 psi
<b>Glicerina</b>	No cuenta con glicerina

### Rotámetro

En la Tabla 44 se muestra los datos obtenidos del rotámetro, no son los necesarios para describir el equipo, esto se debe a que el rotámetro es muy viejo y no se posee ninguna otra información de éste, aun así es ideal para indicación.

Tabla 44. Especificaciones del rotámetro

	<b>Descripción</b>
<b>Equipo</b>	Medidor de flujo (rotámetro)
<b>Marca</b>	Fischer &Porter
<b>Rango</b>	49,51-873,15 L/h

## Regulador de presión

El sistema cuenta con 2 reguladores de presión de las mismas características como se ve en la Tabla 45.

Tabla 45. Regulador de presión

Descripción	
<b>Equipo</b>	Regulador de presión
<b>Marca</b>	Kieley & Mueller
<b>Modelo</b>	467-AIRST
<b>Presión de salida</b>	0-30 psi
<b>Cantidad</b>	2

## Convertidor de Presión a corriente (P/I)

En la Tabla 46 se muestra la descripción de los 3 convertidores que están instalados actualmente.

Tabla 46. Convertidor de P/I

Descripción	
<b>Equipo</b>	Convertidor de Presión a corriente (P/I)
<b>Marca</b>	Foxboro
<b>Modelo</b>	892-24
<b>Entrada</b>	3-15 psi
<b>Salida</b>	4-20 mA dc
<b>Alimentación</b>	12,5-36 Vdc
<b>Mwp</b>	15 psi
<b>Cantidad</b>	3

## Transmisor de presión

Cada uno de los tanques posee un transmisor de presión, con las características mostradas en la Tabla 47, a excepción del Tk3 que sólo es para almacenamiento y suministro.

Tabla 47. Transmisor de presión

	Descripción
<b>Equipo</b>	Transmisor de presión
<b>Marca</b>	Fischer &Porter
<b>Modelo</b>	50LP3111BA
<b>Salida</b>	3-15 psig
<b>Alimentación</b>	20 psi
<b>Mwp</b>	50 psi
<b>Cantidad</b>	2

## Controlador

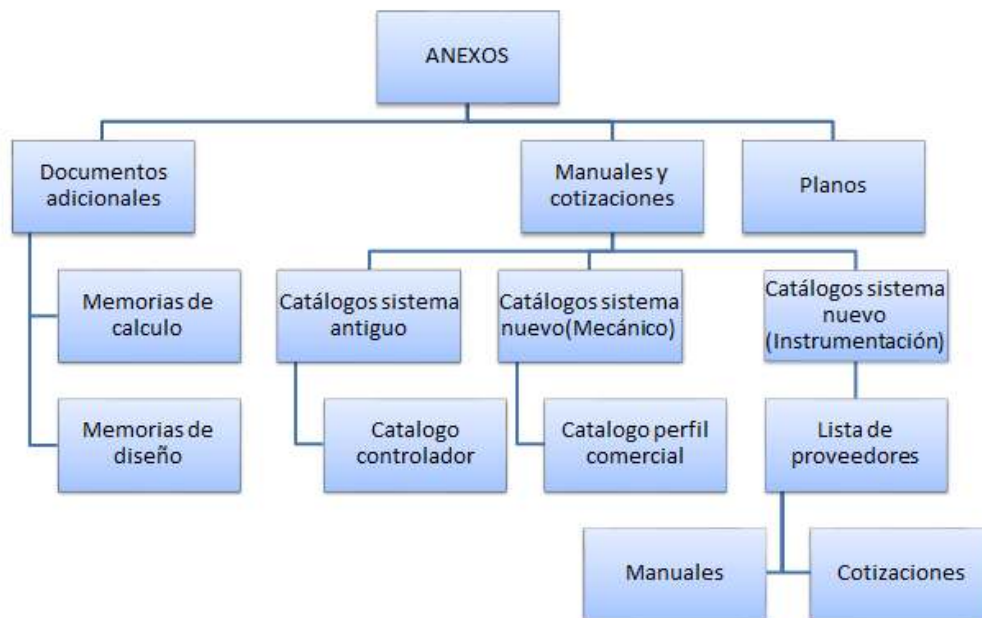
En el Anexo C se encuentra el catálogo con todas las especificaciones del controlador, donde se muestra de forma completa su funcionamiento y como operarlo de forma correcta.

## ANEXO C. MANUALES Y COTIZACIONES

En el CD anexo se encuentran todos los manuales y cotizaciones conseguidas en este trabajo. Se separaron por proveedor y luego se separaron por manuales y cotizaciones, así se puede distinguir de una forma rápida que elemento cotizó cada proveedor. Todo esto se encuentra en una carpeta llamada MANUALES Y COTIZACIONES.

En la Figura 44 se muestra un mapa conceptual donde se explica como está compuesto el CD, con el objetivo de clarificar su uso. Para ver algunos de los documentos se debe tener instalado el programa *Pipe flow expert*, su terminación es (.pfe) y *Solid Edge*, la terminación de los archivos es (.par).

Figura 44. Composición CD de anexos



## **ANEXO D. PLANOS**

En el CD anexo se encuentran los planos de montaje y de los elementos mecánicos necesarios para el montaje, se encuentran numerados, todo esto está en la carpeta llamada, PLANOS.

En Figura 44 se explica como esta compuesto el CD.

## **ANEXO E. DOCUMENTOS ADICIONALES**

En el CD anexo se encuentran todos los documentos adicionales que se generaron durante el desarrollo de este proyecto, todo esto está en la carpeta llamada, DOCUMENTOS ADICIONALES.

En Figura 44 se explica como esta compuesto el CD.