

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA  
FLUJO LÍQUIDO-SÓLIDO**

Presentado Ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Bentivegna P., Gustavo E.  
Para optar por el Título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, Noviembre 2015

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA  
FLUJO LIQUIDO-SÓLIDO**

Tutor Académico: Prof. Julio Segura

Tutor Industrial: Ing., Leonardo Cáliz

Presentado Ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Bentivegna P., Gustavo E.  
Para optar por el Título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, Noviembre 201



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA

Caracas, 04 de Noviembre de 2015

## ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller:

*Gustavo Bentivegna*

Titulado

*"Diseño Conceptual de un Banco de Ensayos para Flujo  
Líquido-Sólido"*

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de: *Ingeniero Mecánica*

Prof. Cristóbal Quevedo  
Jurado



Prof. Johane Bracamonte  
Jurado

Prof. Julio Segura  
Tutor

## DEDICATORIA

*Le dedico este trabajo especial de grado a Dios, a mi abuela  
que en paz descanse, a mis padres, mi familia y mi novia.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar agradecerle a Dios que me dio salud y la fortaleza para culminar cada etapa de mi vida

A mi abuela Bertha por todo su amor, a mis padres Maribel Pacheco y Doménico Bentivegna que han ayudado y apoyado a lo largo de mi vida, a mis hermanas Giovanna Bentivegna y Yarohany Betancourt, y también agradecer a mi novia María Isabel Pérez que ha estado a mi lado y me ha apoyado a lo largo de mi formación como ingeniero.

Así mismo agradecer a mis compañeros y tutores con los cuales compartí durante mi estancia en Intevp.

Igualmente agradecerle a la Universidad Central de Venezuela por darme la oportunidad de ser parte de ella, a los profesores y compañeros de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

A todos, ¡Gracias!

Bentivegna Pacheco, Gustavo Enrique

## **DISEÑO CONCEPTUAL DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA FLUJO LÍQUIDO-SÓLIDO**

Tutor Académico: Julio Segura. Tutor Industrial: Leonardo Cáliz  
Trabajo especial de grado. Caracas, UCV Facultad de Ingeniería, Escuela de  
Ingeniería Mecánica, 2015, 128 Pág.

**Palabras claves:** Flujo Bifásico, Flujo Líquido-Sólido, Banco De Ensayos,  
Inclinación Variable

### **RESUMEN**

En este trabajo especial de grado se ha diseñado un banco de ensayos para el estudio isotérmico de una corriente continua de líquido con sólidos en suspensión a través de tuberías, donde por medio de una metodología que comprende una búsqueda de información, un estudio de tecnologías existentes, que consideran parámetros de operación, entre otros factores, se obtuvieron las especificaciones de diseño. En el diseño se incorporó una estructura de soporte ya existente. Igualmente, este banco de ensayos se caracteriza por su versatilidad en lo que se refiere al ángulo de inclinación de la sección de pruebas, tipos de fluidos y caudales de operación.

Bentivegna Pacheco, Gustavo Enrique

## **CONCEPTUAL DESIGN OF A TEST BENCH FOR LIQUID - SOLID FLOW**

Tutor Académico: Julio Segura. Tutor Industrial: Leonardo Cáliz  
Trabajo especial de grado. Caracas, UCV Facultad de Ingeniería, Escuela de  
Ingeniería Mecánica, 2015, 128 Pág.

**Keywords:** Biphasic Flow, Liquid-Solid Flow, Test Bench, Variable Pitch

### **ABSTRACT**

In this degree thesis has designed a test bench for isothermal study of a continuous stream of liquid with suspended solids through pipes, where by means of a methodology that includes a search for information , a study of existing technologies, operating parameters considered , among other factors, the design specifications were obtained. In designing a structure existing support joined. Similarly, this trainer is characterized by its versatility as regards the angle of inclination of the test section, types of fluids and operating flows.

## TABLA DE CONTENIDO

ACTA .....	III
RESUMEN .....	VI
ABSTRACT .....	VII
TABLA DE CONTENIDO .....	VIII
LISTA DE TABLAS .....	XI
LISTA DE FIGURAS .....	XII
ABREVIATURAS Y SIMBOLOS.....	XIV
INTRODUCCION.....	1
CAPÍTULO I.....	2
1. FUNDAMENTOS DEL PROBLEMA.....	2
1.1. EL PROBLEMA.....	2
1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO.....	4
1.2.1. <i>Objetivo general</i> .....	4
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	4
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	5
CAPÍTULO II.....	7
2. MARCO TEORICO .....	7
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	7
2.1.1. <i>Diseño de un banco de ensayos para el estudio de flujo bifásico isotérmico de gas y de líquido en tuberías. (Gómez, Y. 2005)</i> .....	7
2.1.2. <i>Rediseño y construcción de un banco de ensayos para el estudio de flujo de gas y/o de líquido isotérmico en tuberías. (Tovar, K. e Ibarra, R. 2006)</i> .....	9
2.1.3. <i>Diseño conceptual de un banco de pruebas para medición de campo de velocidades en flujo confinado. (Aranguren, M. 2010)</i> .....	9
2.1.4. <i>NUS (National University of Singapore)</i> .....	10
2.1.5. <i>WASP (Water, Air, Sand and Petroleum)</i> .....	12
2.1.6. <i>SINTEF (The Foundation for Scientific and Industrial Research at the Norwegian Institute of Technology)</i> .....	15
2.1.7. <i>Norsk Hydro Multiphase Flow Loop</i> .....	16
2.1.8. <i>SwRI (Southwest Research Institute)</i> .....	19
2.1.9. <i>Cranfield University (Reino Unido)</i> .....	21
2.1.10. <i>TUFFP (Tulsa University Fluid Flow Projects)</i> .....	22
2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	25
2.2.1. <i>Flujo multifásico</i> .....	25
2.2.2. <i>Patrones de Flujo Líquido-Sólido</i> .....	25
2.2.3. <i>Lechada</i> .....	27
2.2.4. <i>Separadores Ciclónicos</i> .....	28
2.2.5. <i>Principio de funcionamiento</i> .....	29
2.2.6. <i>Tipos de ciclones</i> .....	31



<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>33</b>
<b>3. MARCO METODOLOGICO</b> .....	<b>33</b>
3.1.    ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA.....	33
3.2.    BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA.....	34
3.2.1. <i>Obtención de la información</i> .....	34
3.2.2. <i>Síntesis y revisión de la información</i> .....	35
3.3.    REQUERIMIENTO DE ESPACIO.....	36
3.4.    DIÁMETRO DE LA TUBERÍA.....	37
3.5.    FLUIDOS DE OPERACIÓN.....	37
3.6.    SECCIÓN DE MEZCLA .....	39
3.7.    SUMINISTRO DE LA MEZCLA: SELECCIÓN DE LA BOMBA.....	39
3.8.    LONGITUD DE DESARROLLO .....	39
3.9.    LONGITUD DE PRUEBA .....	44
3.10.   SECCIÓN DE SEPARACIÓN .....	45
3.11.   BASE RECLINABLE .....	51
3.12.   SECCIÓN DE PRUEBA .....	52
3.13.   UNIÓN DE LA SECCIÓN DE PRUEBA .....	53
3.14.   INSTRUMENTACIÓN Y ACCESORIOS.....	53
<b>CAPITULO IV</b> .....	<b>54</b>
<b>4. DESARROLLO DE LA PROPUESTA</b> .....	<b>54</b>
4.1.    REQUERIMIENTOS DE ESPACIO .....	54
4.2.    LONGITUD DE DESARROLLO .....	55
4.3.    SECCIÓN DE MEZCLA .....	59
4.4.    SUMINISTRO DE LA MEZCLA: SELECCIÓN DE LA BOMBA.....	60
4.5.    CAUDALES DE MÍNIMO Y MÁXIMO DE OPERACIÓN .....	61
4.6.    CAÍDA DE PRESIÓN.....	64
4.7.    SECCIÓN DE SEPARACIÓN .....	73
4.8.    BASE RECLINABLE ENTRE 0° Y 90°.....	74
4.8.1. <i>Peso de la tubería</i> .....	75
4.8.2. <i>Estructura principal o cercha</i> .....	76
4.8.3. <i>Apoyos</i> .....	81
4.8.4. <i>Riel</i> .....	87
4.8.5. <i>Patines</i> .....	88
4.8.6. <i>Mecanismo de elevación</i> .....	90
4.8.7. <i>Sujeción de la tubería</i> .....	91
4.9.    SECCIÓN TIPO “U” .....	92
4.10.   SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y ACCESORIOS DE LA TUBERÍA.....	94
4.11.   TANQUES DE ALMACENAMIENTO.....	101
4.12.   SELECCIÓN DE TUBERÍAS .....	104
4.13.   RECOLECCIÓN DE SÓLIDOS.....	105
4.14.   ADECUACIÓN DEL BANCO DE ENSAYOS.....	106
4.14.1. <i>Reubicación de los tanques de almacenamiento</i> .....	106
4.14.2. <i>Reubicación de la bomba</i> .....	107
4.14.3. <i>Ubicación del soporte de la sección de pruebas</i> .....	108
4.14.4. <i>Ubicación de la sección de separación</i> .....	109
4.14.5. <i>Vistas del circuito liquido-sólido</i> .....	110
4.15.   DIAGRAMAS.....	112
4.15.1. <i>Diagrama de Bloque de Procesos (DBP)</i> .....	113

4.15.2. Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) .....	114
4.15.3. Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI) .....	115
4.16. OPERACIÓN DEL CIRCUITO.....	116
4.16.1. Procedimiento de elevación del circuito .....	116
<b>CAPITULO V.....</b>	<b>117</b>
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>117</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>117</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>119</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>120</b>
<b>APÉNDICES .....</b>	<b>123</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones de diseño del circuito NUS .....	11
Tabla 2. Especificaciones de diseño del circuito WASP .....	13
Tabla 3. Especificaciones de diseño de los 3 circuitos .....	15
Tabla 4. Especificaciones de los fluidos utilizados en cada sistema .....	16
Tabla 5. Especificaciones técnicas del circuito multifásico de Norsk Hydro .....	17
Tabla 6. Instrumentos de medición del circuito multifásico de Norsk Hydro .....	19
Tabla 7. Especificaciones de diseño del circuito SwRI .....	20
Tabla 8. Especificaciones de diseño del circuito de Cranfield.....	21
Tabla 9. Especificaciones técnicas del circuito multifásico de 2” de TUFFP .....	23
Tabla 10. Instrumentos de medición del circuito multifásicos de TUFFP.....	23
Tabla 11. Buscadores y palabras claves de búsqueda.....	35
Tabla 12. Propiedades de Aceite Purolub 46/150/220/320 y Agua a 20°C y 40°C....	38
Tabla 13. Factores para dimensionar un hidrociclón .....	50
Tabla 14. Matriz de selección de la base reclinable.....	52
Tabla 15. Numero de Reynolds multifásico según Norma PDVSA MDP-02-FF-06 para tubería de 2 pulgadas.....	55
Tabla 16. Número de Reynolds para tuberías de 2 pulgadas.....	56
Tabla 17. Numero de Reynolds para tubería de 2” .....	63
Tabla 18. Velocidad de sedimentación en tubería de 2” .....	64
Tabla 19. Rugosidades absolutas de los distintos materiales.....	67
Tabla 20. Longitud de accesorios del circuito .....	71
Tabla 21. Caída de presión del circuito a un caudal de 6GPM.....	72
Tabla 22. Caída de presión del circuito a un caudal de 26 GPM .....	73
Tabla 23. Datos de entrada del hidrociclón.....	73
Tabla 24. Dimensiones del hidrociclón según Rietema.....	74
Tabla 25. Propiedades Mecánicas de tubo estructural cuadrado según la Norma ASTM A 500.....	78
Tabla 26. Propiedades químicas de tubo estructural cuadrado según la Norma ASTM A 500.....	78
Tabla 27. Propiedades mecánicas de la viga estructural de perfil IPE.....	88
Tabla 28. Espacio entre soportes de tubería.....	91
Tabla 29. Características de medidores de caudal .....	95
Tabla 30. Especificaciones del medidor de caudal electromagnético.....	96
Tabla 31. Especificaciones del medidor de Temperatura .....	98
Tabla 32. Especificaciones del encamisado de la termocupla .....	98
Tabla 33. Especificaciones del medidor de presión .....	99
Tabla 34. Especificaciones del sensor de nivel.....	100
Tabla 35. Cantidad de accesorios en el circuito.....	101
Tabla 36. Tabla de dimensiones de la pata de soporte de un tanque vertical .....	103
Tabla 37. Propiedades mecánicas .....	105
Tabla 38. Propiedades químicas.....	105

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema y ubicación y de los instrumentos de medición del circuito .....	8
Figura 2. Diagrama de flujo de procesos del banco de pruebas de medición de campo de velocidades. ....	10
Figura 3. Diagrama de circuito multifásico de la Universidad de Singapur .....	11
Figura 4. Instalación multifásica de la Universidad de Singapur.....	12
Figura 5. Diagrama de circuito de WASP.....	14
Figura 6. Partes Principales del flujo multifásico de Norks Hydro.....	17
Figura 7. Vista ampliada de la sección de prueba del circuito de 3” .....	18
Figura 8. Representación del circuito de flujo multifásico del SwRI. ....	20
Figura 9. Representación del circuito de la Universidad de Cranfield .....	22
Figura 10. Representación del circuito multifásico de TUFFP.....	24
Figura 11. Sección de prueba de circuito multifásico de TUFFP .....	24
Figura 12. Flujo totalmente suspendido .....	26
Figura 13. Flujo con cama movable.....	27
Figura 14. Flujo con cama estacionaria.....	27
Figura 15. Separador ciclónico .....	29
Figura 16. Dirección del flujo dentro del separador ciclónico.....	30
Figura 17. Configuración geométrica del hidrociclón .....	31
Figura 18. Configuración de entrada del hidrociclón.....	32
Figura 19. Esquema de la metodología empleada.....	33
Figura 20. Estructura metálica sin modificaciones .....	36
Figura 21. Viscosidad relativa de la lechada.....	43
Figura 22. Zona de visualización .....	44
Figura 23. Toma de presión del circuito .....	45
Figura 24. Geometría de un hidrociclón convencional .....	46
Figura 25. Relación entre la ecuación EC2 y el número de Reynolds en la entrada según Rietema .....	47
Figura 26. Relación entre la ecuación EC3 y el número de Reynolds en la entrada según Rietema .....	49
Figura 27. Bosquejos de la tormenta de ideas de la base reclinable .....	51
Figura 28. Sección de unión de la tubería de reclinable .....	53
Figura 29. Estructura del circuito modificado.....	54
Figura 30. Longitud de desarrollo para tubería de 2” a 20°C .....	57
Figura 31. Relación L/D para tuberías de 2” a 20°C .....	57
Figura 32. Longitud de desarrollo para tuberías de 2” a 40°C.....	57
Figura 33. Relación L/D para tuberías de 2” a 40°C .....	58
Figura 34. Dispositivo mezclador .....	59
Figura 35. Ensamblaje tanque-mezclador .....	60
Figura 36. Bomba de slurry marca Goulds .....	61
Figura 37. Diagrama de Moody .....	69
Figura 38. Largos equivalentes para las pérdidas localizadas.....	70
Figura 39. Longitudes equivalentes de singularidades en tubos .....	71

Figura 40. Geometría de la sección reclinable .....	74
Figura 41. Geometría de la cercha o apoyo principal .....	77
Figura 42. Perfil de tubo estructural cuadrado .....	77
Figura 43. Análisis de esfuerzos aplicados a la cercha .....	80
Figura 44. Geometría para calcular la longitud del vástago.....	81
Figura 45. Geometría para calcular el ángulo del vástago .....	82
Figura 46. Diagrama de Cuerpo Libre de la cercha .....	83
Figura 47. Análisis de esfuerzos realizado al apoyo principal.....	85
Figura 48. Geometría asignada al vástago. ....	86
Figura 49. Apoyo entre la cercha y el travesaño del vástago.....	86
Figura 50. Soporte secundario de la cercha .....	87
Figura 51. Perfil de viga IPE.....	88
Figura 52. Soporte de la viga de unión de los rieles .....	89
Figura 53. Análisis de esfuerzos realizados al patín de deslizamiento .....	90
Figura 54. Cabrestante eléctrico.....	90
Figura 55. Soporte de tubería tipo 49.....	92
Figura 56. Tubería en forma de U.....	93
Figura 57. Vista Isométrica de la estructura metálica. ....	94
Figura 58. Medidor de caudal electromagnético.....	97
Figura 59. Encamisado de termocupla.....	98
Figura 60. Tanques de almacenamiento de líquido.....	102
Figura 61. Detalles de ubicación del soporte del tanque.....	104
Figura 62. Ubicación de los tanques de almacenamiento .....	106
Figura 63. Ubicación de la bomba .....	107
Figura 64. Ubicación de la estructura con inclinación variable .....	108
Figura 65. Ubicación del hidrociclón.....	109
Figura 66. Vista isométrica del banco de ensayos .....	110
Figura 67. Vista frontal del banco de ensayos .....	111
Figura 68. Diagrama de Bloque del circuito multifásico. ....	113
Figura 69. Diagrama de Flujo de Procesos. ....	114
Figura 70. Diagrama de Tuberías e Instrumentación. ....	115

## ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

$Ge_{gas}$  = Gravedad especifica del gas

$Ge_{liquido}$  = Gravedad especifica del líquido

$Ge_{crudo}$  = Gravedad especifica del crudo

$\rho_{gas}$  =Densidad de gas

$\rho_{aire}$  = Densidad del aire

$\rho_{liquido}$  =Densidad del líquido

$\rho_{agua}$  = Densidad del agua

$\tau$  =Esfuerzo cortante

$\mu$  =Viscosidad

$\rho$  =Densidad

$\gamma$  =Viscosidad cinemática

$\mu m$  = Micrómetro

$gpm$  = Galones por minuto

$Atm$  = Atmosfera

$bbbl/d$  =Barriles por día

$NUS$  = National University of Singapore

$WASP$  =Water, Air, Sand and Petroleum

$SINTEF$  =The Foundation for Scientific and Industrial Research at the Norwegian  
Institute of Technology

$SwRI$  =Southwest Research Institute

$scfm$  = Standard cubic feet per minute

$TUFFP$  =Tulsa University Fluid Flow Projects

$D$  = Diametro

$ft$  = Feet (pies)

$MMSCFD$  = Million standard cubic feet per day

$pulg$  = Pulgada

$cP$  = Centipoise  
 $cST$  = CentiStokes  
 $SG$  = Specific Gravity  
 $\rho_m$  = Densidad de la slurry  
 $V$  = Velocidad  
 $\mu_m$  = Viscosidad del slurry  
 $F_\mu$  = Factor de viscosidad relativa  
 $\rho_m$  = Densidad de la slurry  
 $\rho_L$  = Densidad del fluido  
 $\rho_S$  = Densidad del solido  
 $\lambda$  = Fracción volumétrica del solido en el fluido  
 $L_d$  = Longitud de desarrollo  
 $Re$  = Reynolds  
 $Re_{inlet}$  = Reynolds en la entrada  
 $d$  = Diámetro de la partícula  
 $\Delta\rho$  = Diferencia de densidad  
 $\Delta P$  = Caída de presión de operación  
 $EC2$  = Número adimensional  
 $EC3$  = Número adimensional  
 $b$  = Diámetro de la entrada  
 $G$  = Factor de caída de presión  
 $EspD$  = Espacio disponible  
 $Rig$  = Rigidez  
 $Ang$  = Angulo  
 $Ubic$  = Ubicación  
 $FaConst$  = Fácil Construcción  
 $Pond$  = Ponderación  
 $Clasf$  = Clasificación

$Pun$  = Puntuación

$Mod$  = Modelo

$L$  = Longitud

$Q$  = Caudal

$A$  = Area

$V_{min}$  = Velocidad mínima

$V$  = Velocidad

$V_{max}$  = Velocidad máxima

$V_s$  = Velocidad de sedimentación

$g$  = Gravedad



## INTRODUCCION

El flujo multifásico se puede definir como la presencia de dos o más fases en una misma línea de corriente, el presente proyecto está orientado al estudio de mezclas de fluidos considerando las fases líquido y sólido en el interior de una tubería. El estudio de flujo multifásico es de suma importancia en la industria petrolera, ya que al momento de la extracción del petróleo junto al viene aunado una cantidad de gases, sólidos y otros líquidos, esto acarrea caídas de presión y el agua presente aumenta la corrosión en estas tuberías. Ocasionando así, un mayor costo de mantenimiento en los tramos de tubería de instalaciones de superficie donde se presentan dichos fluidos.

Por lo general, el diseño de un banco experimental para manejo de flujo multifásico se realiza con la finalidad de estudiar el comportamiento de dichos fluidos en las tuberías de superficie, ya que al conocer estos comportamientos que tomen los fluidos, los costos de operación y mantenimiento se verán disminuidos. El presente proyecto se basará en el diseño conceptual de un banco de pruebas de flujo bifásico líquido-sólido, donde se contemplara todos los elementos y factores necesarios, así como, las limitaciones presentes al momento de realizar la propuesta de diseño.

## CAPÍTULO I

### 1. FUNDAMENTOS DEL PROBLEMA

#### 1.1. El problema

Según Falcone, G., Hewitt, G. y Alimonti, C. (2010) definen de forma general: “el flujo multifásico consiste en el paso simultáneo por sistemas de corrientes compuestas por dos o más fases”.

El flujo multifásico, en la industria petrolera se puede observar en tuberías de transporte de gas o petróleo, en equipos asociados a las estaciones de perforación, producción y refinación, igualmente el flujo multifásico se presenta de las siguientes maneras:

- Gas-liquido
- Gas-liquido-liquido
- Gas-liquido-sólido
- Gas-liquido-liquido-sólido
- Líquido-sólido

En la actualidad, el estudio de flujos multifásicos es de suma importancia, ya que en la producción de un pozo petrolero, el crudo viene acompañado de gases, líquidos y sedimentos sólidos.

Durante el transporte del petróleo desde los pozos hasta las plataformas, diferentes tipos de régimen de flujo pueden ocurrir dependiendo del diámetro de la tubería, presión, caudal del líquido, caudal del gas, viscosidad del aceite, corte de agua, temperatura e inclinación de la tubería. (Kang, C., More, P. P. y Vera, J. R., 2006). La predicción de un patrón de flujo puede ser muy importante, ya que dependiendo del

patrón líquido-sólido que se presente, una tubería puede presentar mayor corrosión, desgaste, taponamiento o puede haber caídas de presión elevadas, lo que aumenta los costos de bombeo y mantenimiento y estos pueden ocasionar fallas en el funcionamiento de los equipos e instalaciones de superficie, es por ello la importancia de crear circuitos experimentales donde se puedan estudiar el comportamiento de los fluidos de producción en las tuberías.

Según Brennen (2005) Existen varios tipos de modelos para el estudio de los flujos multifásico:

- “Teórico: que consiste en el uso de ecuaciones y modelos matemáticos para el estudio del flujo.
- Computacional: que usa herramientas computacionales para la simulación y estudio de los flujos.
- Experimental: que a través de circuitos de banco de pruebas estudia de manera observativa mediante equipos e instalaciones apropiadas el comportamiento del flujo multifásico”.

Con base en lo anteriormente expuesto, INTEVEP como brazo tecnológico de PDVSA, filial de investigación tiene como orientación estratégica generar soluciones tecnológicas integrales en el ámbito petrolero en Venezuela, requiere actualizar la infraestructura o bien sea de crear un nuevo circuito experimental de manejo de flujo multifásico con manejo de sólidos en los laboratorios de esta empresa.

Por tal motivo, la gerencia de Infraestructura y Mejoramiento recurre a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela para diseñar un circuito de un banco de pruebas de flujo bifásico con manejo de sólidos a ser mejorado o desarrollado en sus instalaciones mediante trabajos especiales de grado; con el objetivo de estudiar el comportamiento de los fluidos de producción.

## **1.2. Objetivos del trabajo**

### 1.2.1. Objetivo general

Diseñar conceptualmente un circuito de banco de ensayos para el manejo de flujo bifásico líquido-sólido.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica en la base de datos de INTEVEP y en las universidades.
- Determinar los criterios y parámetros de diseño para instalaciones de manejo de flujo bifásico líquido-sólido.
- Diseñar un soporte móvil entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  para la sección de prueba del circuito experimental.
- Seleccionar los equipos e instrumentación, tuberías y accesorios que componen una instalación experimental de flujo bifásico líquido-sólido.

## **1.3. Justificación**

En la filial tecnológica de PDVSA se busca diseñar un circuito de banco experimental multifásico con manejo de sólidos con la finalidad de predecir el comportamiento de dichos fluidos, y así, reducir costos en las instalaciones multifásicos de superficie de PDVSA, No obstante mantener a la empresa INTEVEP S.A. en la vanguardia mundial en instalaciones experimentales de este tipo.

En las instalaciones de Intevep no se cuenta con un banco de pruebas que maneje partículas sólidas, es por esto, que desde el punto de vista científico se enfoca en el diseño de un banco experimental para manejo de flujo bifásico líquido-sólido, con la finalidad de estudiar los patrones de flujo multifásico en tuberías bajo condiciones controladas.

En este sentido se requiere estudiar y determinar los criterios de diseño para este tipo de instalaciones y selección de los equipos y accesorios correctos, minimizando así la incertidumbre, costos de operación, el riesgo de diseño y operación de sistemas de transporte multifásico en las instalaciones experimentales de INTEVEP S.A.

#### **1.4. Alcances y limitaciones**

Las limitaciones del proyecto de investigación radica en la determinación de criterios de diseño, selección de equipos y diseño de un banco de circuito experimental de manejo de flujo bifásico líquido-sólido, la realización de este diseño estará enfocado a la parte conceptual, ya que en este proyecto no contemplara la construcción de dicho circuito.

Un alcance que presenta este proyecto es que no se tomara en cuenta el estudio de transferencia de calor del circuito, es decir, el banco experimental se tomara como proceso adiabático. En este ámbito, cabe destacar que la temperatura máxima de operación de circuito no deberá exceder los 40°C de manera de proporcionar seguridad a los operadores en dicho banco de ensayos. En este diseño tampoco se enfocara en realizar cualquier tipo de estudio referente a flujo bifásico líquido-sólido.

La empresa INTEVEP con la finalidad de disminuir los costos de construcción de dicho circuito, el diseño conceptual del banco experimental de flujo líquido-sólido se diseñara sobre la estructura de un circuito escala banco ya existente en dicha empresa realizando las modificaciones necesarias en su estructura, y seleccionando los equipos e instrumentos de medición necesarios para instalaciones de flujo líquido-sólido.

Igualmente en busca de la flexibilidad del circuito, uno de los alcances de este diseño contempla la construcción de una sección de prueba con inclinación variable con la finalidad de poder realizar pruebas, tanto de manera ascendente como descendente.

Por otra parte, la búsqueda bibliográfica realizada en instalaciones de fluidos multifásicos se basó en los siguientes buscadores: ScienceDirect, OnePetro, y Engineering Village, universidades del país, RIPPET y CIT.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEORICO

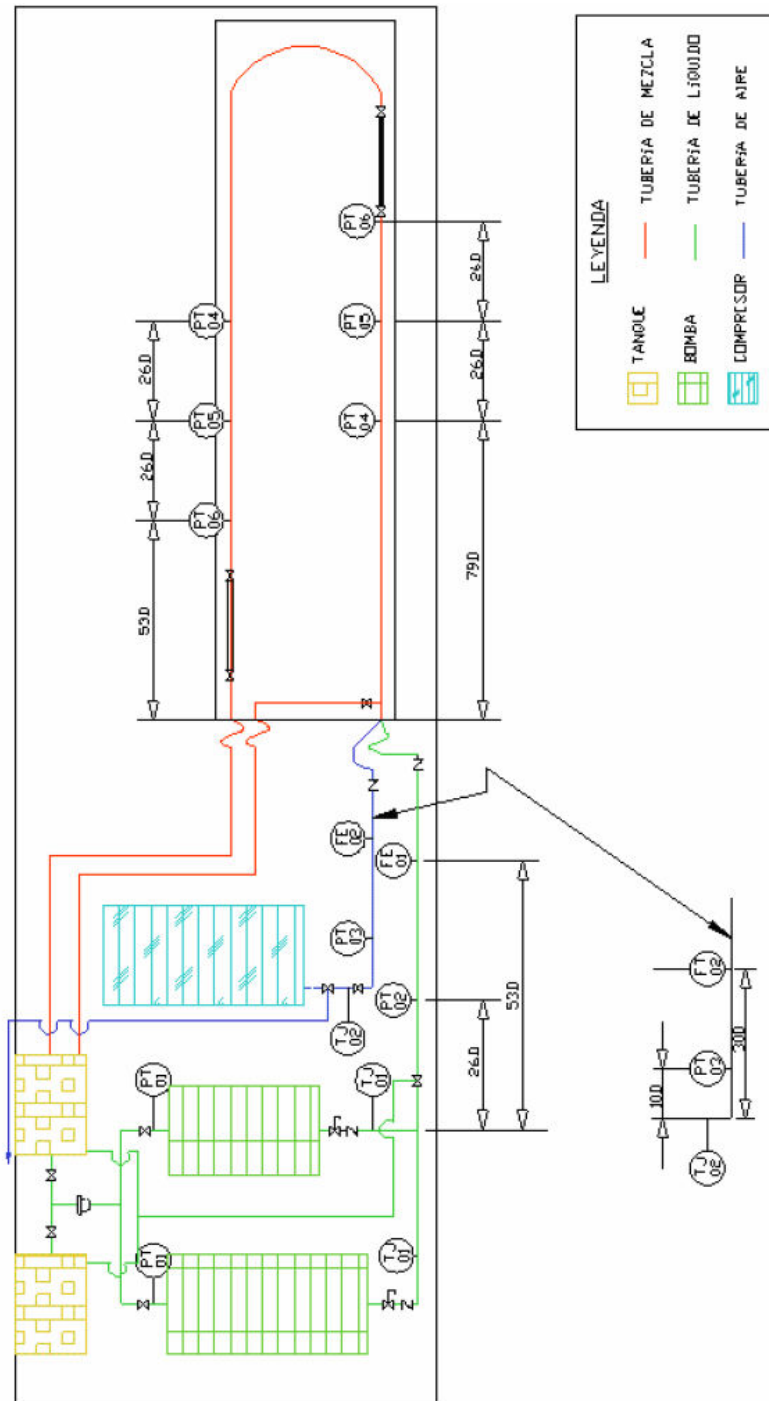
#### **2.1. Antecedentes de la Investigación**

En este capítulo se han seleccionado 10 bancos de prueba a nivel mundial de una extensa revisión bibliográfica dando como resultado un total de 45 bancos de prueba. Este análisis que se realizara a los bancos de prueba seleccionados determinara los parámetros más importantes utilizados en el diseño de dichos bancos.

Esta investigación presenta un estudio de las instalaciones de flujo multifásico con manejo de los siguientes fluidos: aceite, agua, aire y sedimentos sólidos. Se enfoca en las especificaciones técnicas, instrumentos, inclinación, dimensiones y composición de las secciones de prueba, de manera de poder obtener un criterio de diseño en la construcción de dicho circuito, ya que se sabe que no existe tal criterio, y de esta manera poder diseñar un banco de ensayos que logre representar un circuito líquido-sólido en las instalaciones de PDVSA-INTEVEP.

##### 2.1.1. Diseño de un banco de ensayos para el estudio de flujo bifásico isotérmico de gas y de líquido en tuberías. (Gómez, Y. 2005)

Esta tesis fue realizada en la Universidad Central de Venezuela en el año 2005, este proyecto se enfoca en la realización de un diseño de un banco de ensayos de flujo gas-líquido. Dicho proyecto incluye el diseño de una inclinación de la sección de pruebas entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  con respecto a la horizontal. A continuación en la Figura 1 se muestra el esquema de dicho circuito y la ubicación de los instrumentos de medición.



Fuente: Gómez, Y. (2005)  
 Figura 1. Esquema y ubicación de los instrumentos de medición del circuito



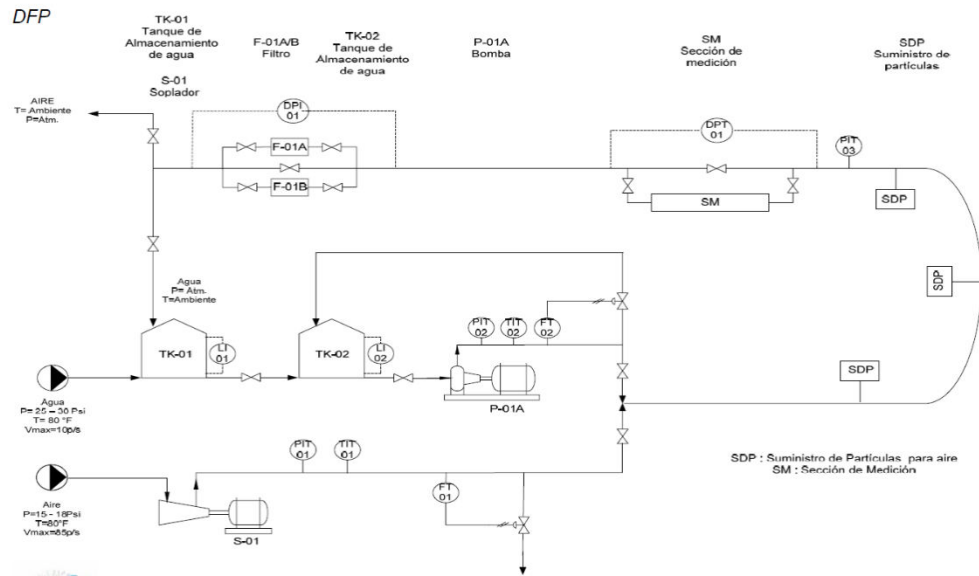
2.1.2. Rediseño y construcción de un banco de ensayos para el estudio de flujo de gas y/o de líquido isotérmico en tuberías. (Tovar, K. e Ibarra, R. 2006)

Esta tesis se realizó en la Universidad Central de Venezuela en el año 2006, dicho trabajo de grado se basó como su título expone en rediseñar y construir la propuesta del banco de ensayos de Gómez, Y. (2005), este se enfoca principalmente en modificar y construir la inclinación de la sección de pruebas.

2.1.3. Diseño conceptual de un banco de pruebas para medición de campo de velocidades en flujo confinado. (Aranguren, M. 2010)

Este proyecto de grado se realizó en la Universidad Experimental Politécnica Antonio José de Sucre en conjunto con la empresa INTEVEP-PDVSA, este se basó en la realización de un circuito experimental de flujo Agua-Aire, con la finalidad de estudiar la medición de los campos de velocidades en flujo confinado así como su título lo expresa, dicho circuito se realiza sobre un marco de tubo estructural cuadrado.

A continuación en la Figura 2 se ilustra el Diagrama de Flujo de Proceso de dicho banco de pruebas.



Fuente: Aranguren, M. (2010)

Figura 2. Diagrama de flujo de procesos del banco de pruebas de medición de campo de velocidades.

#### 2.1.4. NUS (National University of Singapore)

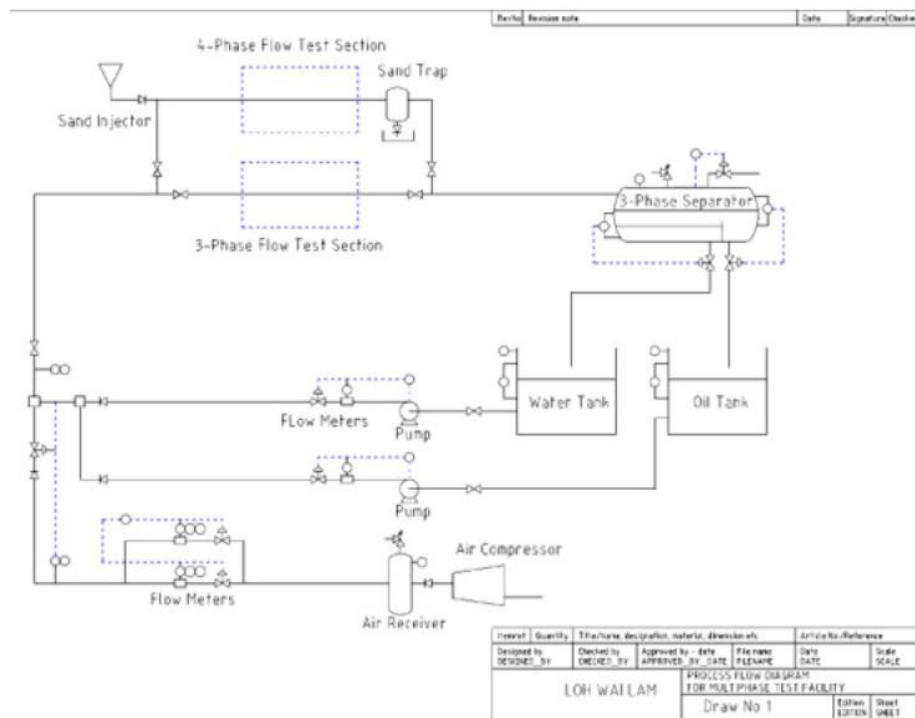
La Universidad de Singapur fundada en el año de 1905 posee una instalaciones de manejo de flujos de tres y cuatro fases, aceite-agua-aire (-arena), estas instalaciones son utilizadas para probar equipos, y soportar investigaciones de flujo multifásico y aseguramientos de flujos.

En el esquema de la Figura 3, se puede observar una extensión paralela de la sección de prueba de flujo de 3 fases, en esta extensión se observa una inyección de arena creando así una sección de prueba para el estudio de la erosión ocasionada por la arena en las tuberías, este sólido (arena) se inyecta mediante una tolva motorizada, luego de la sección de prueba del flujo de 4 fases se puede observar una trampa de

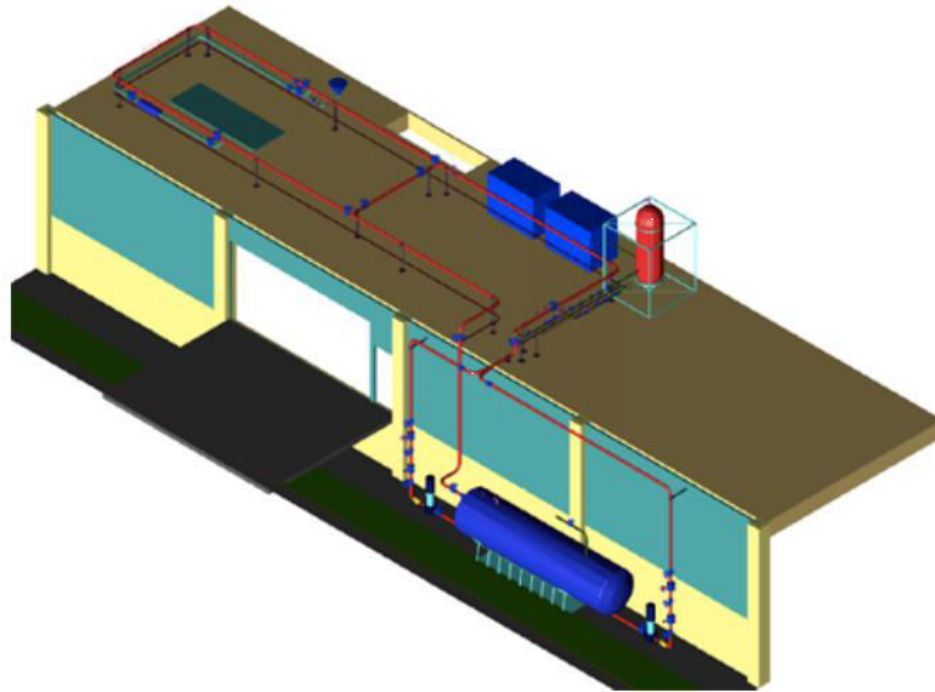
arena. Igualmente se logra observar en la Figura 4 la vista isométrica del circuito de esta institución. Los diámetros de sección de prueba de esta instalación son de 2", 4" y 6" sin embargo en un futuro se busca instalar una tubería de 8" de diámetro paralela a la de 4" ya existente, dichas especificaciones de este circuito se pueden observar en la Tabla 1.

**Tabla 1. Especificaciones de diseño del circuito NUS**

Circuito	Fases	Presión de Operación	Rango de Temp.	Diámetro de Tubería	Longitud Tubería Horizontal	Inclinación de la tubería	Longitud Tubería Vertical
		bar	°C		m	Deg	m
NUS	4 fases	S/I	S/I	2", 4" y 6"	S/I	S/I	S/I



**Figura 3. Diagrama de circuito multifásico de la Universidad de Singapur**



**Figura 4. Instalación multifásica de la Universidad de Singapur**

#### 2.1.5. WASP (Water, Air, Sand and Petroleum)

Este circuito fue construido en el año de 1989 en el instituto del Imperial College of London, por el Departamento de Ingeniería Química. El circuito consta con una sección de prueba del 37 m de longitud, con un diámetro de tubería de 3", el material de la tubería es acero inoxidable, presión máxima de trabajo 30 bares y diferentes ángulo de inclinación de la sección de prueba que varía de  $-1^\circ$  hasta  $2^\circ$  con respecto a la horizontal, cabe destacar que este circuito fue construido para manejar flujos de hasta cuatro fases, dichas especificaciones del circuito se pueden observar en la Tabla 2.

**Tabla 2. Especificaciones de diseño del circuito WASP**

Circuito	Fases	Presión de Operación	Presión Mínima	Rango de Temp.	Diámetro de Tubería	Longitud Tubería Horizontal	Inclinación de la tubería	Longitud Tubería Vertical
		bares	bar	°C	in	m	Deg	m
WASP	4 fases	30	S/I	S/I	3"	37	-1° hasta 2°	S/I

A continuación en la Figura 5, se puede visualizar el diagrama del circuito del instituto WASP.

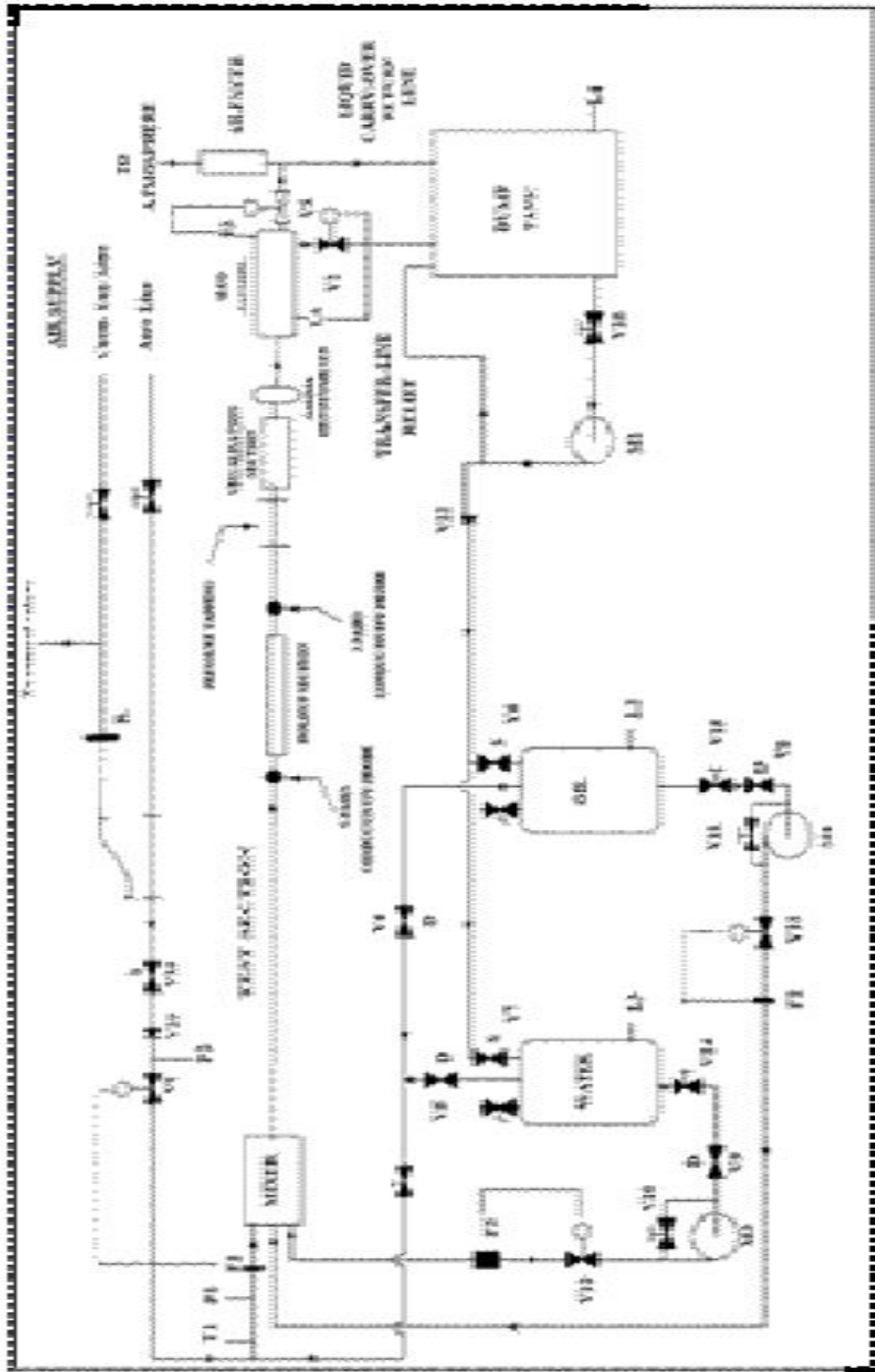


Figura 5. Diagrama de circuito de WASP

2.1.6. SINTEF (The Foundation for Scientific and Industrial Research at the Norwegian Institute of Technology)

Este instituto se estableció en el año de 1950 por el NTH (Norwegian Institute of Technology). SINTEF consta con 3 instalaciones de manejo de flujo multifásicos: (a) Gran escala, (b) mediana escala y (c) pequeña escala, siendo el de interés el de mediana y pequeña escala ya que posee inclinaciones de 0° a 90° con manejo de tres (3) tipos de fluidos más sólidos. A Continuación, en las Tabla 3 y Tabla 4 se mostraran los rangos de operación y dimensiones de los bancos de pruebas presentes en este instituto.

**Tabla 3. Especificaciones de diseño de los 3 circuitos**

Circuito	Fases	Presión de Operación	Presión Mínima	Rango de Temp.	Diámetro de Tubería	Longitud Tubería Horizontal	Inclinación de la tubería	Longitud Tubería Vertical
		bar	bar	°C		m	Deg	m
Gran Escala	2 fases	90	5	10 a 50	8", 4" y 12"	800	0°, 0.5° y 1°	55
Mediana Escala	3 fases + Sólidos	10	Atm.	5 a 50	2.5", 3" y 4"	50	-4° a 4°	35
Pequeña Escala	3 Fases + Sólidos	100	Atm.	-10 a 80	1" y 2"	50	0° a 90°	2

**Tabla 4. Especificaciones de los fluidos utilizados en cada sistema**

Circuito	Fases	Tasa de Flujo de Gas (Tipo de Gas)	Tasa de Flujo de Aceite (Tipo de aceite)	Tasa de Flujo de Agua
		Am <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h
Gran Escala	2 fases	2 a 1500 (Nitrógeno)	3 a 500 (Nafta)	50
Mediana Escala	3 fases + Sólidos	5 a 160 (Gas Inerte)	0.1 a 80 (Exxol D80)	0.1 a 120
Pequeña Escala	3 Fases + Sólidos	0 a 3 (Gas)	0 a 5 (Cualquier aceite)	0 a 5

#### 2.1.7. Norsk Hydro Multiphase Flow Loop

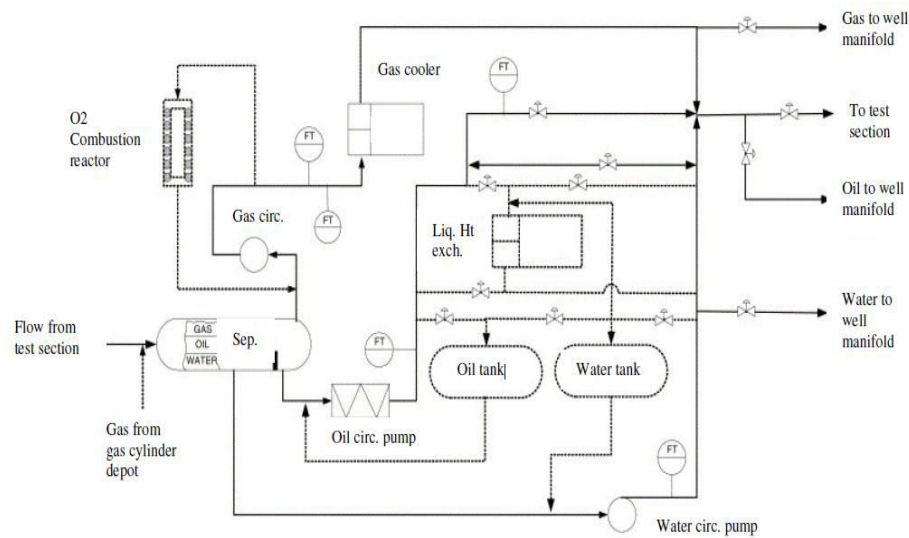
Norsk Hydro ASA en el año de 1991 empezó la construcción de un circuito experimental de flujo multifásico. Este circuito en 1994 estuvo listo para operar en completo funcionamiento, con la finalidad de realizar estudios de fenómenos multifásicos tales como, emulsiones, comportamiento de flujo gas/agua/aceite, pruebas de equipos e instrumentación, entre otros estudios.

Este circuito está construido para simular unos comportamientos realísticos bajo condiciones de pruebas controladas de presión y temperatura de manera realística de gas/agua/aceite, que permiten representar el comportamiento de estos sistemas. Las especificaciones de este sistema se muestran en la Tabla 5, y el esquema del circuito en la Figura 6 y Figura 7.

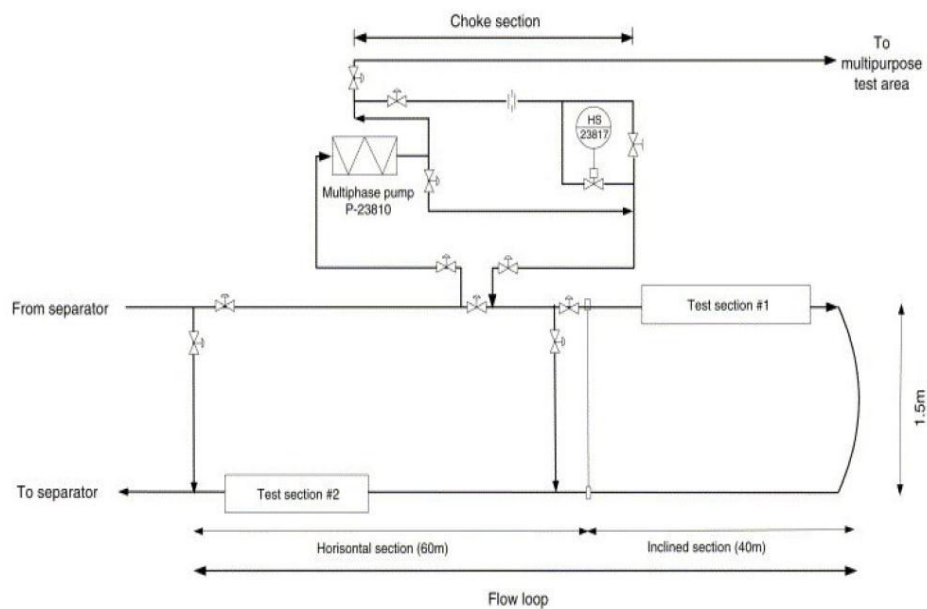


**Tabla 5. Especificaciones técnicas del circuito multifásico de Norsk Hydro**

Fases	Tres (Gas, Aceite y Agua)
Capacidad de Agua, gpm	0 a 176
Capacidad de Aceite, bbl/d	0.3 a 176
Capacidad de Liquido, gpm	0 a 264
Capacidad de Gas, Scam	0.2 a 121
Presión Máxima, psi	1.595
Máxima Presión de Caída, psi	580
Rango de Temperatura, °F	23 a 284
Diámetro Interno de Tubería, in.	3
Longitud del Circuito, ft	656
Inclinación	-6° a 10°
Material	Acero Duplex
Agua	Agua, MeOH o Glycol
Aceite	Petróleo
Gas	Gas Hidrocarburo



**Figura 6. Partes Principales del flujo multifásico de Norsk Hydro**



**Figura 7. Vista ampliada de la sección de prueba del circuito de 3”**

A continuación, se mostrara en la Tabla 6 los instrumentos de medición utilizados en el circuito de Norsks Hydro.

**Tabla 6. Instrumentos de medición del circuito multifásico de Norsk Hydro**

<b>Instrumentos</b>	<b>Modelo</b>	<b>Descripción</b>
Medidor de Flujo de Aceite	Rheonik Micro Motion	Coriolis, Medidor de Flujo Masico.
Medidor de flujo de Agua	Rheonik Micro Motion	
Medidor de Flujo de Liquido	Endress-Hauser	
Medidor de Flujo de Gas	Instromet SM-RI	Caudalímetro de gas de turbina
	Fisher Rosemount	V-Cone, Medidor de Diferencial de Presión
Transmisor de Presión	Rosemount 2088G4A2	
Transmisor de Temperatura	Pt-100, INOR TRA R6X	
Indicador de Separador de Nivel	Sentech Profile Gauge	40 Sondas de Capacitancia

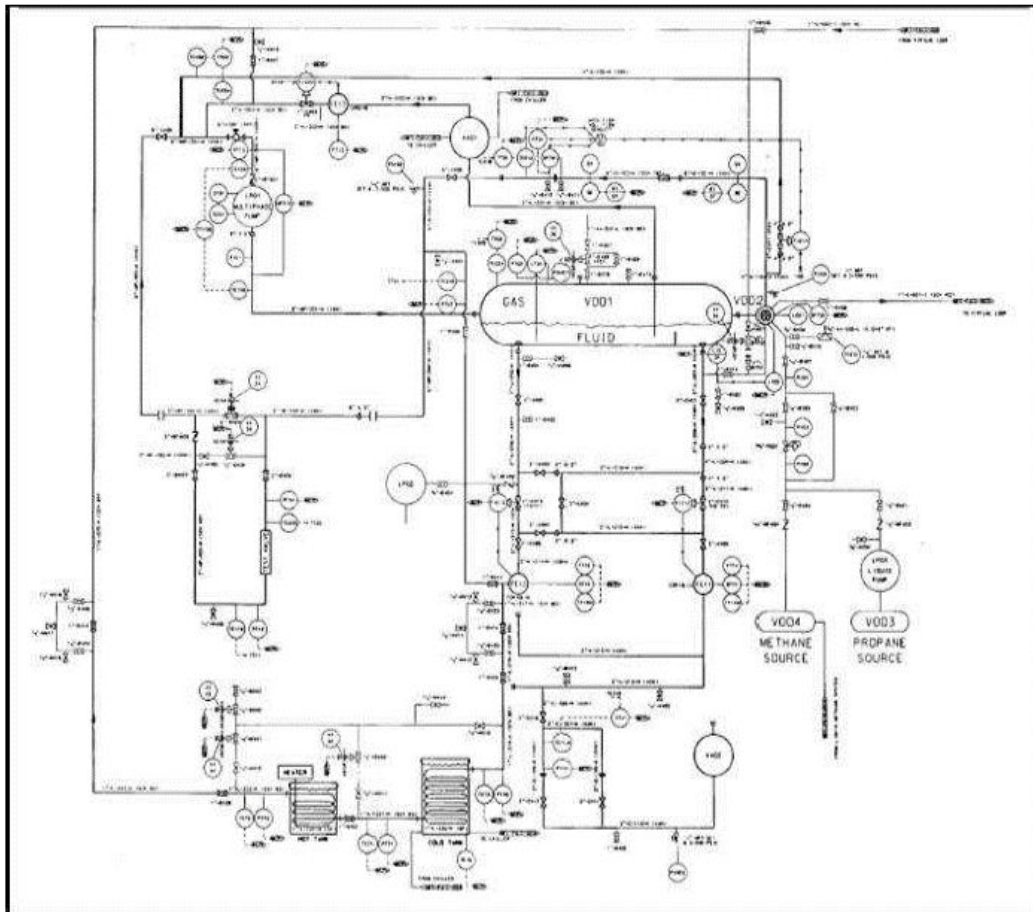
#### 2.1.8. SwRI (Southwest Research Institute)

Este instituto fue fundado en el año de 1947, las instalaciones de este circuito son utilizadas para realizar pruebas a equipos de flujo multifásico e investigaciones tales como, medición de flujo multifásico, aseguramiento de flujo, mediciones de gas húmedo y diseño y operación de tuberías submarinas. Este instituto también posee un circuito de estudio de flujo multifásico con un amplio rango de fluidos utilizados como: gas natural, nitrógeno, crudo, condensados, líquido refinado, agua, agua salada y una combinación de agua y aceite. En la Tabla 7 se puede observar que este circuito trabaja con unas condiciones de operación de 100 psi a 3.600 psi de presión con un

rango de temperatura de -40 °F hasta 120 °F y con una tasa de caudal entre 0 y 120 scfm. En la Figura 8 se observa el esquema del circuito del SwRI.

**Tabla 7. Especificaciones de diseño del circuito SwRI**

Circuito	Fases	Presión de Operación	Presión Mínima	Rango de Temp.	Diámetro de Tubería	Longitud Tubería Horizontal	Inclinación de la tubería
		psi	psi	°F	in	ft	Deg
SwRI	S/I	3.600	100	40° - 120°	1" a 5"	216	0° a 90°



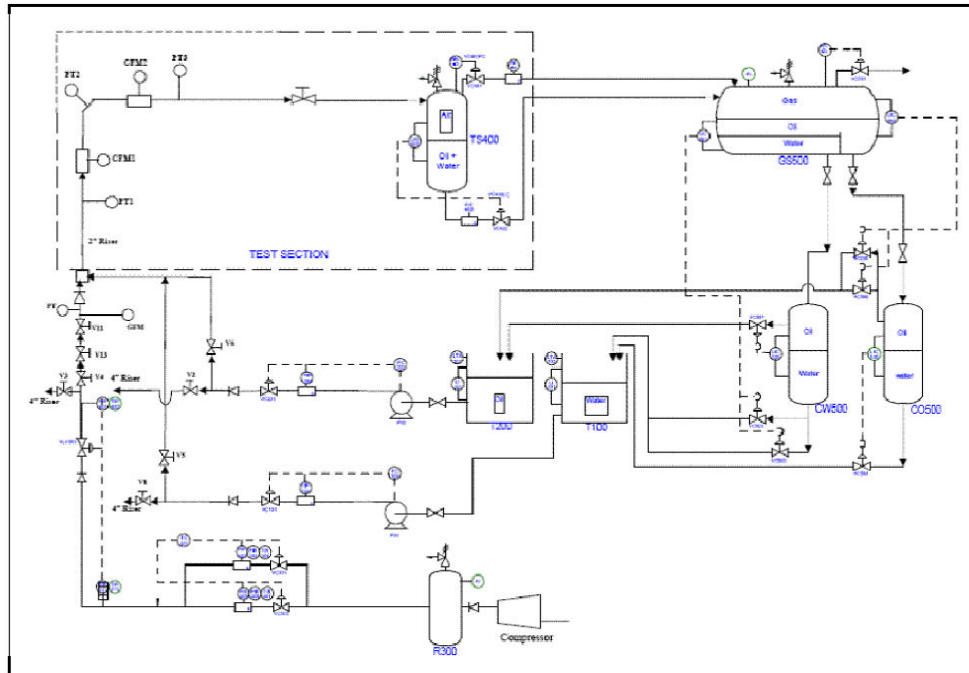
**Figura 8. Representación del circuito de flujo multifásico del SwRI.**

### 2.1.9. Cranfield University (Reino Unido)

*Cranfield's impressive Oil and Gas Engineering Laboratory*, este laboratorio fue construido en el año 2005 por el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Procesos. Este circuito fue creado para realizar experimentos de flujo multifásico bajo diferentes condiciones de operación. El banco de prueba posee una tubería con un diámetro de 250 mm y un sistema de bombeo de este banco de pruebas es capaz de suministrar 4250 m<sup>3</sup>/h de aire y 140 m<sup>3</sup>/h de agua y aceite, estas especificaciones se pueden visualizar en la Tabla 8.

**Tabla 8. Especificaciones de diseño del circuito de Cranfield**

Circuito	Fases	Presión de Operación	Presión Mínima	Rango de Temp.	Diámetro de Tubería	Longitud Tubería Horizontal	Inclinación de la tubería
		bares	bares	°C	mm	m	Deg
Cranfield	S/I	S/I	S/I	S/I	250	S/I	S/I



**Figura 9. Representación del circuito de la Universidad de Cranfield**

#### 2.1.10. TUFFP (Tulsa University Fluid Flow Projects)

El instituto TUFFP fue creado en el año de 1973, este fue el primer circuito experimental en investigaciones de manejo de flujo multifásico en tuberías en el mundo, en este programa de investigación se han desarrollado muchas de las tecnologías en la producción y transporte de petróleo y gas. Estas instalaciones cuentan con 6 circuitos de manejo de flujo multifásico, siendo la de interés el circuito de 2" de gas-aceite-agua, el cual está diseñado para realizar estudios bifásicos y trifásicos de los fluidos con las configuraciones gas-liquido, liquido-liquido y gas-agua-aceite. Como se podrá observar en la Tabla 9 tenemos las velocidades superficiales de los fluidos de prueba con un diámetro de 2", una sección de prueba de 108D y una región de desarrollo de 274D. También este banco de prueba posee una sección reclinable entre  $-5^\circ$  y  $5^\circ$ . Los instrumentos utilizados para la toma de pruebas se pueden observar en la Tabla 10.

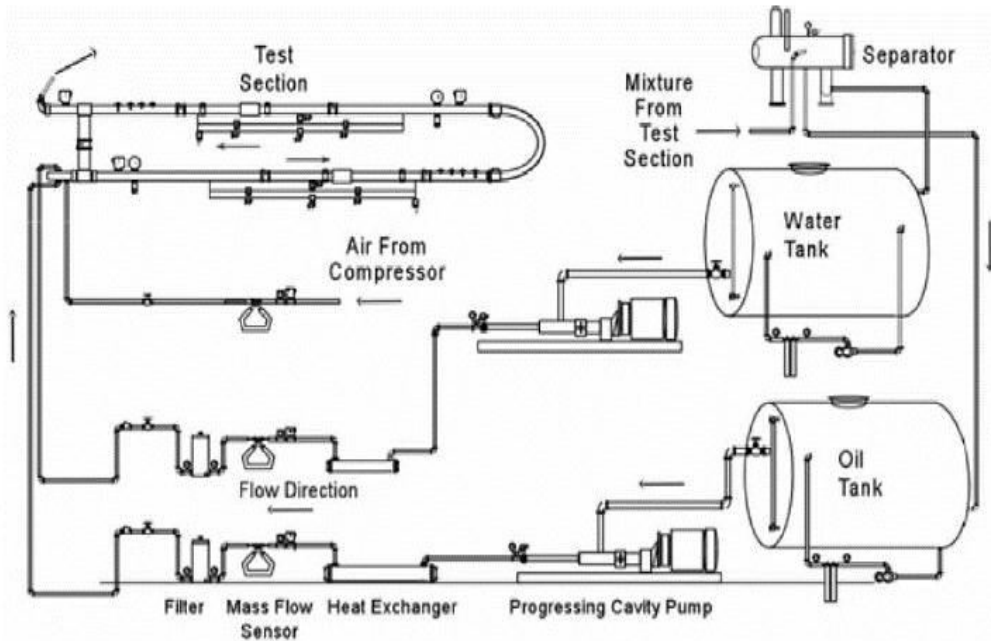
**Tabla 9. Especificaciones técnicas del circuito multifásico de 2" de TUFFP**

<b>Fases</b>	<b>Aire, Agua y Aceite Mineral</b>
Presión Máxima, psig	30
Temperatura	Ambiente
Tasa de flujo del Gas, MMSCFD	0 a 0.55 (Velocidad Superficial 0 a 100 ft/s)
Tasa de Flujo de Agua, BPD	0 a 1600 (Velocidad Superficial 0 a 4.8 ft/s)
Tasa de Flujo de Aceite,	0 a 1600 (Velocidad Superficial 0 a 4.8 ft/s)
Material	R-4000 PVC
Diámetro de la Tubería, in	2
Longitud de la Sección de Prueba, ft	18 (108D)
Longitud de Sección de Desarrollo, ft	45.6 (274D)
Región de Salida, ft	10 (60D)
Inclinación	-5 ° a 5°

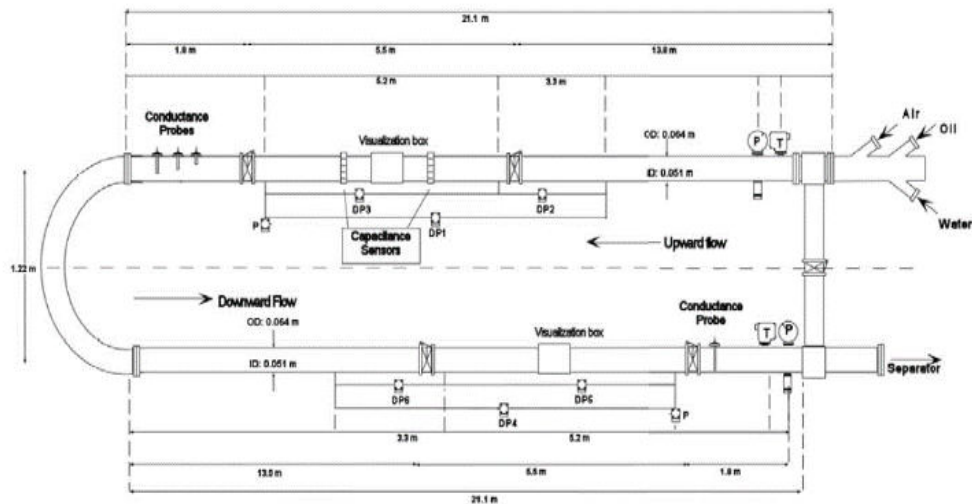
**Tabla 10. Instrumentos de medición del circuito multifásicos de TUFFP**

<b>Parámetros</b>	<b>Instrumentos</b>
Patrones de Flujo	Camara de Alta Velocidad
Holdups	Válvulas de Cerrado Rápido
Gradiente de Presión	Transductor de Presión Diferencial
Distribución de la Fases	Sonde de Conductividad
Tamaño de Gota	Cámara de Alta velocidad
Fracción de las fases	Sonda ISO-Cinético
Sistema de Adquisición de Datos	LabView

A continuación en la Figura 10 y Figura 11 se mostraran la representación esquemática del banco de pruebas y de la sección de prueba.



**Figura 10. Representación del circuito multifásico de TUFFP**



**Figura 11. Sección de prueba de circuito multifásico de TUFFP**



## 2.2. Fundamentos Teóricos

### 2.2.1. Flujo multifásico

El flujo multifásico lo podemos definir como el paso simultáneo a través de un sistema o tubería compuesto por dos o más fases o dos o más fluidos inmiscibles, Según Falcone (2007), los flujos más comunes que podemos encontrar son:

- Flujo bifásico: se refiere al flujo simultaneo de 2 fases a través de un conducto o canal en cualquiera de las siguientes combinaciones:
  - Gas-Líquido.
  - Gas-Sólido.
  - Líquido-Sólido.
  - Líquido-Líquido (para líquidos inmiscibles).

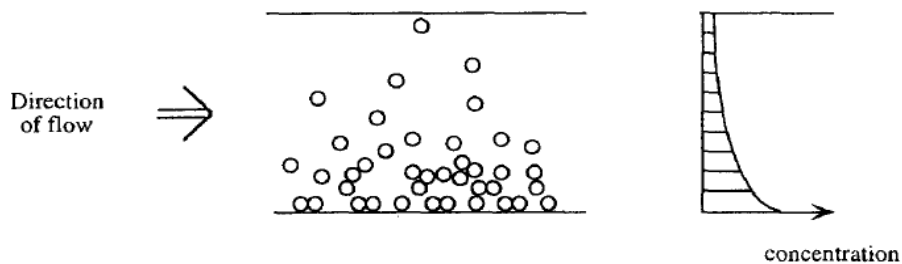
### 2.2.2. Patrones de Flujo Líquido-Sólido

Según Doron y Barnea (1996) los patrones de flujo existentes en fluidos líquido-sólido son los siguientes:

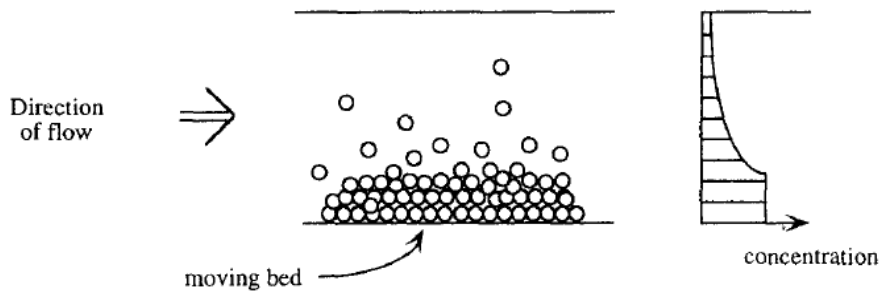
Flujo totalmente suspendido: a caudales altos de flujo mixto las partículas sólidas están suspendidas. El patrón de flujo totalmente suspendido puede ser subdividido en dos sub-patrones: (a) Suspensión Pseudohomogenea, cuando las partículas sólidas están distribuidas de manera uniforme a través de la sección transversal de la tubería las velocidades de la mezcla requeridas para tal patrón de flujo son usualmente muy altas y no pueden ser consideradas velocidades prácticas; (b) Flujo suspendido heterogéneamente, cuando hay un gradiente de concentración en la dirección perpendicular al eje de la tubería, con un mayor transporte de partículas por la parte baja de la sección transversal de la tubería, este caso se puede ilustrar en la Figura 12 este el caso más común encontrado.

Flujo con cama movable: a bajos caudales de flujo mixto las partículas sólidas se acumulan en el fondo de la tubería, Figura 13. De este modo forman una capa de lecho compacto, que se mueve a lo largo del fondo de la tubería. La concentración de esta capa corresponde al embalaje máximo, o casi. La parte superior de la sección transversal de la tubería está ocupada por una mezcla heterogénea.

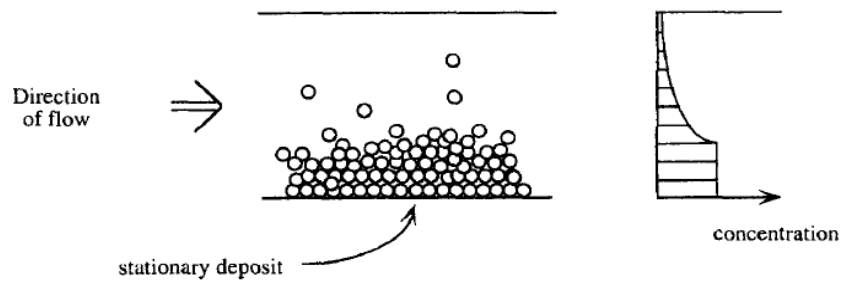
Flujo con una cama estacionaria: cuando el caudal de la mezcla es demasiado bajo para generar un movimiento en todas las partículas inmersa en el fluido, se logra observar en el fondo de la tubería un deposito estacionario de partículas, Figura 14. En la parte superior de este depósito las partículas son transportadas como una capa separada en movimiento. En muchos casos se logra observar dunas en la parte superior de la cama, un fenómeno conocido como “*Saltation*”. El resto de la tubería está ocupada por la mezcla heterogénea, aunque su perfil de concentración es mucho más pronunciada que en los otros patrones de flujo.



**Figura 12. Flujo totalmente suspendido**  
**Fuente: Doron y Bernea (1996)**



**Figura 13. Flujo con cama movable**  
Fuente: Doron y Bernea (1996)



**Figura 14. Flujo con cama estacionaria**  
Fuente: Doron y Bernea (1996)

### 2.2.3. Lechada

Según las normas PDVSA MDP-02-FF-06 La lechada o *Slurry* es una mezcla de partículas sólidas y líquidas. Este puede ser transportado por tuberías o canales y puede ser bombeado. Las dos fases no reaccionan químicamente y pueden ser separados por medios mecánicos.

#### Lechada compactada

Son Lechadas con concentraciones de sólidos suficientemente altas para que las partículas estén en contacto.

#### Lechadas diluidas

Son Lechadas en las cuales las partículas no están en contacto.

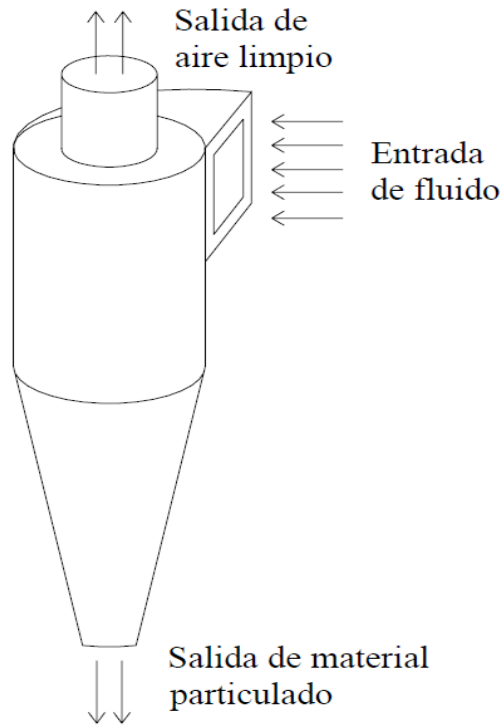
### Velocidad crítica de sedimentación

La norma PDVSA MDP-02FF-06 nos define la velocidad crítica de sedimentación es la velocidad lineal más baja en la tubería a la cual no se acumularán sólidos en el fondo. A velocidades por debajo de la crítica, estos se acumularán hasta que la velocidad lineal de flujo en la porción abierta de la tubería sea equivalente a su velocidad crítica de sedimentación correspondiente.

La velocidad requerida para arrastrar partículas sedimentadas en una tubería será siempre mayor que la velocidad crítica de sedimentación. En tuberías horizontales, la velocidad de arrastre puede ser dos o tres veces más alta que la velocidad crítica de sedimentación

#### 2.2.4. Separadores Ciclónicos

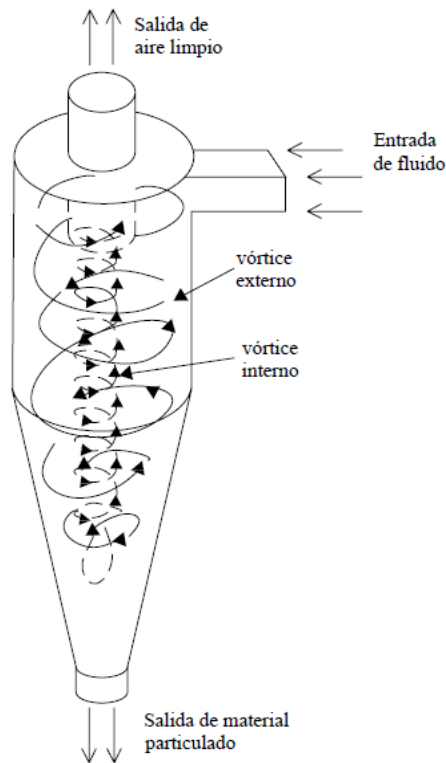
Los ciclones son uno de los equipos más usados en la industria para la separación de partículas sólidas, ya sea usando gas o líquido como la otra fase de separación. Su notoriedad se debe a su gran sencillez y facilidad de construcción, debido a que estos mecanismos no poseen partes móviles y apenas exigen mantenimiento. Así mismo destaca el hecho de que usa las fuerzas centrifugas ocasionando un aumento en la velocidad de sedimentación de las partículas haciendo más efectiva su separación, Aranguren (2010).



**Figura 15. Separador ciclónico**  
fuente: (Caplan, 1968)

#### 2.2.5. Principio de funcionamiento

Los separadores ciclónicos, por lo general se utilizan para separar partículas con diámetros mayores a  $10 \mu m$ , el flujo con las partículas sólidas entra tangencialmente cerca de la parte superior del ciclón realizando un movimiento giratorio.



**Figura 16. Dirección del flujo dentro del separador ciclónico**

La velocidad tangencial de las partículas tiende a desplazarlas hacia la periferia del dispositivo y el movimiento espiral del fluido da cierta aceleración radial hacia el centro del cilindro, mientras que al mismo tiempo la fuerza gravitacional produce una aceleración hacia abajo. Como resultado, las partículas forman una trayectoria espiral hacia abajo debido a la forma del ciclón, saliendo por la parte inferior del separador hacia un recolector, mientras que el otro fluido (gas o líquido) se mueve ascendentemente al núcleo central saliendo por el vértice (*vortex finder*).

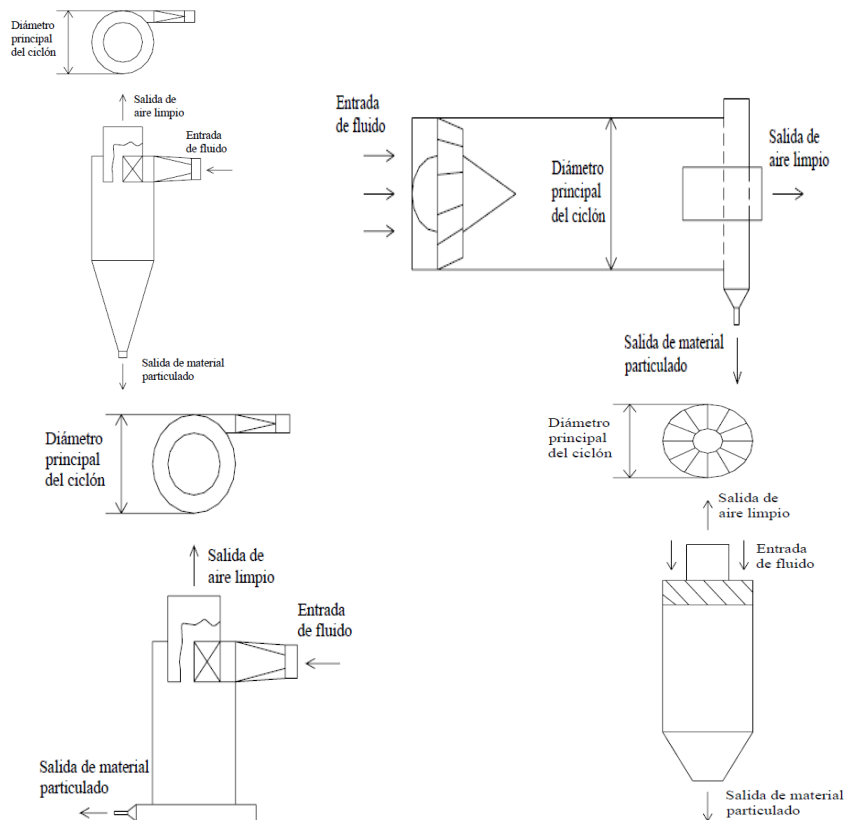
A altas velocidades tangenciales, la fuerza centrífuga sobre la partícula tiene un valor mayor a la fuerza de gravedad, por lo que los ciclones llevan a cabo la separación de los sólidos más rápida y efectivamente cuando se trata de partículas de unas tantas micras, Aguilar (2008).

## 2.2.6. Tipos de ciclones

Existen varias maneras en la que podemos clasificar los ciclones, tenemos: según su disposición geométrica, según su configuración de entrada y según su eficiencia.

### Disposición geométrica

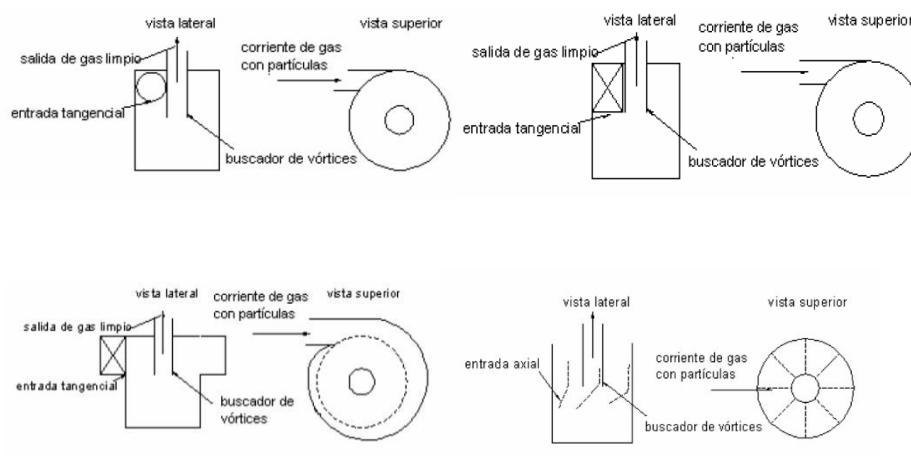
- Entrada tangencial y descarga axial:
- Entrada tangencial y descarga periférica
- Entrada y descarga axial
- Entrada axial y descarga periférica



**Figura 17. Configuración geométrica del hidrociclón**

## Configuración de entrada

- Entrada circular
- Entrada rectangular
- Entrada en espiral
- Entrada axial



**Figura 18. Configuración de entrada del hidrociclón**

## Según su eficiencia

- Muy eficientes (98% - 99%)
- Moderadamente eficientes (70% - 80%)
- De baja eficiencia (50%)

La eficiencia de un ciclón está en gran medida en función de su tamaño, ya que se sabe que los ciclones más pequeños son los que poseen mayor eficiencia en la separación. De igual forma se sabe que la altura también influye sobre la eficiencia, aumentando esta con la altura.



## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLOGICO

En este capítulo se detallara cada uno de los aspectos relacionados con la metodología empleada y se mostrara los mecanismos y criterios utilizados para determinar cada una de los parámetros de diseño del circuito experimental a escala banco para dar respuesta a los objetivos planteados. Dentro de marco conceptual del diseño de este banco de pruebas también se realizó una búsqueda bibliográfica de los trabajos e instalaciones multifásicas con manejo de partículas sólidas con la finalidad de desarrollar un criterio y parámetros de construcción de dichas instalaciones.

#### 3.1. Esquema de la metodología.

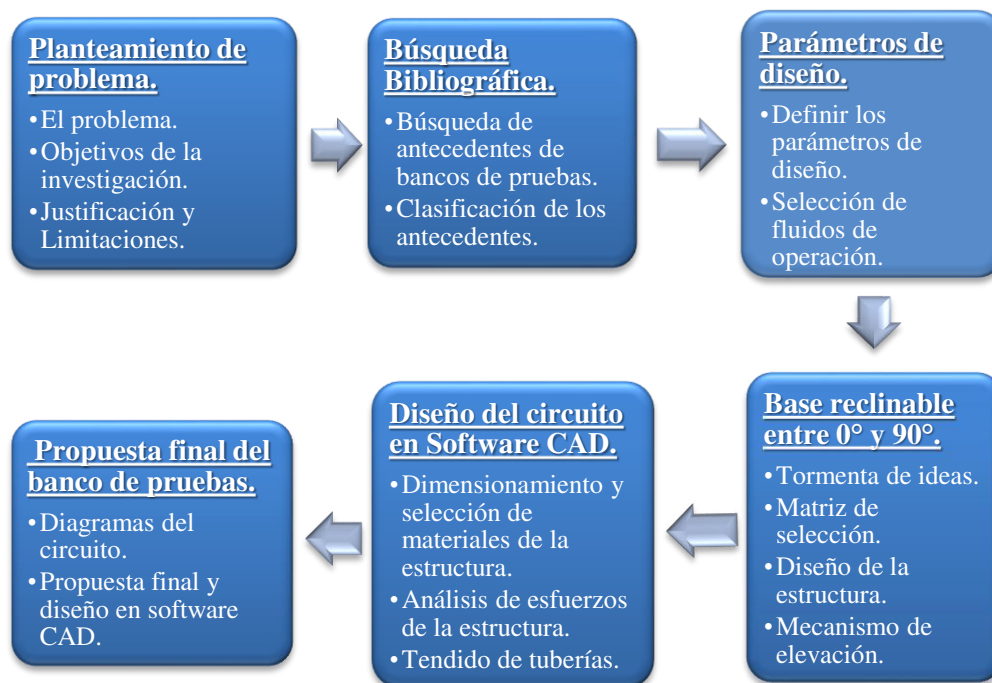


Figura 19. Esquema de la metodología empleada.

### **3.2. Búsqueda bibliográfica**

Para empezar se realiza una búsqueda bibliográfica en base al tema en específico, con la finalidad de investigar las tendencias en cuanto a investigaciones de flujo multifásico con manejo de sólidos existen a nivel mundial, igualmente al no tener un criterio de diseño para la creación de dichos circuitos experimentales, se busca mediante la investigación bibliográfica crear dicho criterio y obtener una perspectiva del área de trabajo, lo cual permita diseñar un banco de prueba escala banco que cumpla con las medidas y requisitos necesarias, para así, realizar estudios lo más exactos posibles en lo que a flujo líquido-sólido se refiere.

#### **3.2.1. Obtención de la información**

En este apartado se realizó una búsqueda de información en distintas fuentes de información, tanto nacionales como internacionales. Dichas fuentes y palabras de búsqueda son las siguientes:

**Tabla 11. Buscadores y palabras claves de búsqueda**

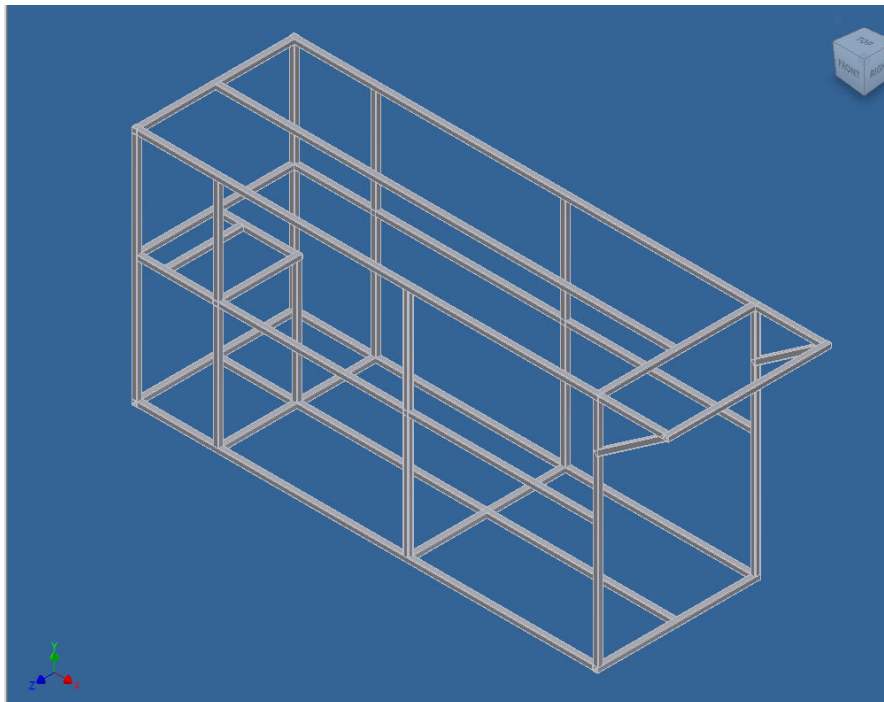
<b>Buscadores</b>	<b>Palabras Claves de Búsqueda</b>
<b>Internet (Google)</b>	Multiphase flow, Flujo Multifásico, Diseño de Banco de Pruebas, Instalaciones de flujo Multifásico, Multiphase Test Facilities.
<b>Engineering Village</b>	Multiphase Flow loop, Liquid-Solid-Gas, Multiphase test Facilities, Multiphase Flow Desing, Slurry Flow, Modelling of Multiphase Flow.
<b>Science Direct</b>	
<b>One Petro</b>	
<b>Colección General y Documentación Técnica (RIPPET)</b>	Flujo Multifásico, Diseño de Circuitos experimentales Multifasicos.
<b>Universidades a Nivel Nacional (UCV, USB, UDO, LUZ)</b>	Flujo Multifásico, Diseño de banco de pruebas.

### 3.2.2. Síntesis y revisión de la información

En esta sección se realizó un análisis de toda la información obtenida de las fuentes utilizadas, primeramente se realizó un descarte general de los artículos y trabajos que no aportan mucha información del trabajo especial de grado, posteriormente se realiza una lectura detallada, que permite realizar una clasificación con la finalidad de filtrar mejor la información y obtener de cada documento los aportes necesarios para el trabajo especial de grado.

### 3.3. Requerimiento de espacio

Se refiere al espacio físico necesario o disponible para el diseño y ubicación de este proyecto, como sabemos el diseño de un circuito multifásico es muy complejo, donde se deben tomar en cuenta muchos factores como lo son el diámetro de tubería, el material a utilizar, los fluidos de operación, entre muchos más factores. La Gerencia de Infraestructura y Mejoramiento propone el diseño de un circuito experimental multifásico con manejo de Partículas Sólidas. Dicho diseño se realizara sobre un marco de tubería estructural cuadrada de medidas 50x50x2.5, ya existente en el laboratorio de Noreste 4 en las instalaciones de INTEVEP-PDVSA, la cual ya ha sido utilizada para realizar experimentos de flujos bifásicos en dicha empresa. En la Figura 20 se puede visualizar la estructura existente modelado en el Software Autodesk Inventor 2010.



**Figura 20. Estructura metálica sin modificaciones**

### **3.4. Diámetro de la tubería**

El diámetro de la tubería es uno de los parámetros más importantes en el diseño del circuito experimental, ya que a partir de la selección de dicho valor se calcula la longitud de desarrollo. Por esto, la gerencia de Infraestructura y Mejoramiento propone la utilización de una tubería de 2 pulgadas, siendo este un valor común en los diámetros de tubería revisado en la bibliografía de los circuitos experimentales de flujo multifásico a nivel mundial, como lo podemos observar en los institutos del SINTEF, TUFFP y el NUS.

Igualmente este diseño de banco de prueba podría adaptarse a un cambio de diámetro de 1 pulgada, haciéndolo versátil para realizar pruebas con estos diámetros planteados. Se plantean estos valores ya que para diámetros menores a estos no se lograra generar ciertos patrones de flujo, lo cual limitaría la versatilidad y la capacidad del banco de pruebas, y otro factor que influye en la selección de este diámetro de tubería se debe a las limitaciones de espacio que se poseen para el diseño de este circuito multifásico, ya que colocando tuberías de mayores diámetros se sobre dimensionaría para la estructura existente.

### **3.5. Fluidos de operación**

Los fluidos a utilizar en el banco de ensayos son de suma importancia ya que con cada uno de estos se podrán estudiar los patrones de flujo, caídas de presión, entre otros factores, dependiendo de las viscosidades de cada fluido de trabajo, y así comparar dichos resultados para lograr predecir los comportamientos presentes en las tuberías y equipos presentes en las instalaciones de campo de PDVSA a nivel nacional, también determinando cada fluido de trabajo se determinara el peso de la tubería y las pérdidas ocasionadas por las juntas, codos y uniones de la tubería, entre otros; permitiendo así poder tener más datos para la solución del diseño de dicho proyecto.

Los fluidos de operación a utilizar en dicho circuito son los siguientes:

- Fase líquida: Para la fase líquida se tienen dos tipos de fluidos los cuales son agua común y aceites PUROLUB 46/150/220/320, y a continuación se muestra la .
- Tabla 12 con las propiedades de dichos fluidos.

**Tabla 12. Propiedades de Aceite Purolub 46/150/220/320 y Agua a 20°C y 40°C**

<b>Aceite Mineral PUROLUB 320</b>	<b>Viscosidad cP (cST)</b>	<b>S.G</b>	<b>API</b>
20°C (68°F)	857,7 (960,4)	0,893	26,9
40°C (104°F)	285,76 (320)	0,893	26,9
<b>Aceite Mineral PUROLUB 220</b>	<b>Viscosidad cP (cST)</b>	<b>S.G</b>	<b>API</b>
20°C (68°F)	552,3 (621,9)	0,888	27,8
40°C (104°F)	195,35 (220)	0,888	27,8
<b>Aceite Mineral PUROLUB 150</b>	<b>Viscosidad cP (cST)</b>	<b>S.G</b>	<b>API</b>
20°C (68°F)	357,7 (404,2)	0,885	28,3
40°C (104°F)	132,75 (150)	0,885	28,3
<b>Aceite Mineral PUROLUB 46</b>	<b>Viscosidad cP (cST)</b>	<b>S.G</b>	<b>API</b>
20°C (68°F)	88,4 (101)	0,875	30,2
40°C (104°F)	40,25 (46)	0,875	30,2
<b>Agua</b>	<b>Viscosidad cP (cST)</b>	<b>S.G</b>	<b>API</b>
20°C (68°F)	1,002 (1,004)	0,998	10
40°C (104°F)	0,653 (0,658)	0,992	10

- Fase sólida: para la fase sólida se recomienda utilizar sólidos del tipo cerámico inerte, ya que por su composición y por los aceites a utilizar en este banco de prueba, son de fácil manejo y como se busca la reutilización de dicho material, su limpieza es más fácil de realizar en comparación con cualquier tipo de arena. El rango de tamaño de partícula debe estar entre

$300 \mu\text{m} < D_p < 700 \mu\text{m}$ . igualmente se debe acotar que el % v/v de los sólidos en el líquido será de aproximadamente 20%.

### **3.6. Sección de mezcla**

Como es sabido el circuito a diseñar es de flujo bifásico líquido-sólido, por esto se busca una manera de realizar la inyección del sólido al circuito. De tal manera, se decide realizar la mezcla de las fases en los tanques de almacenamiento, donde por medio de un dispositivo mezclador, este agita las partículas sólidas depositadas en el fondo del tanque, para así poder realizar una succión homogénea mediante la bomba. Se decide utilizar esta configuración para la mezcla de los fluidos, ya que al realizar la inyección del sólido directamente a la tubería aguas abajo de la bomba, se necesitaría una gran cantidad de partículas sólidas para realizar los experimentos sin necesidad de separar y realizar la limpieza de estos sólidos.

### **3.7. Suministro de la mezcla: Selección de la bomba**

Como se mencionó anteriormente, el suministro de las partículas sólidas al circuito experimental se realiza mezclado el líquido con dichos sólidos en el tanque de almacenamiento. Es por esto que se debe seleccionar un equipo de bombeo que maneje las dos fases presentes. De tal manera, dicha bomba debe abarcar los caudales a los cuales opera este banco de pruebas y de igual manera debe ser un tipo de bomba especial de manejo de partículas sólidas.

### **3.8. Longitud de desarrollo**

Para la construcción del circuito de manejo de flujo multifásico se debe considerar las longitudes de desarrollo del fluido, en flujo monofásico nos referimos a longitud de desarrollo como aquella longitud donde el fluido no cambia su perfil de velocidad en dicha dirección, sin embargo los cálculos para longitudes de desarrollo de flujo multifásico no se ha estudiado en mucha profundidad. por otra parte, se dice que el flujo bifásico está desarrollado, cuando se identifica una configuración geométrica

dada entre las fases y se mantiene en cierto tramo de la tubería, hasta que las condiciones de operación se cambian, entonces ocurre un cambio en la configuración.

Realizando un estudio a los circuitos de flujo multifásico a nivel mundial se puede visualizar una gran variación en cuanto a longitudes de desarrollo se refiere, como por ejemplo tenemos el circuito diseñado por Gómez (2005) y construido posteriormente por Tovar e Ibarra (2006) con una longitud de  $80D$  equivalente a 3 metros, también podemos observar grandes longitud de desarrollo en el circuito de WASP con una relación de  $487D$  equivalente a 37 m.

Es sabido, que para flujos monofásicos laminares se necesitan de mayores longitudes de desarrollo en comparación a flujos monofásicos turbulento. Algunos autores como Daily y Halerman (1975) y Avallone y Baumeister (1995) indican que para flujo turbulento las distancias de longitud de desarrollo son muchos más cortas en comparación a un flujo laminar y como la turbulencia no depende del número de Reynolds la relación  $L/D$  va de 25 a 50, sin embargo algunos autores como Beattie (1982) y García (2004), afirman que se pueden realizar buenas aproximaciones tomando las longitudes de desarrollo para flujo monofásico turbulento en comparación con las longitudes de desarrollo necesarias para flujo bifásicos. Por otra parte, en la norma PDVSA MDP-02-FF-06 nos indica una manera de calcular en número de Reynolds para flujos bifásicos líquido-sólido, al no poseer suficiente información sobre el cálculo del número de Reynolds para flujos bifásicos procedemos a calcular este valor de dos maneras utilizando la norma PDVSA anteriormente nombrada y las afirmaciones realizadas por Beattie (1982) y García (2004), del cual obteniendo el mayor número del Reynolds se procede a calcular la longitud de desarrollo para el banco de pruebas utilizando las ecuaciones planteadas por White.

Para calcular las longitudes de desarrollo primera que nada debemos calcular el número de Reynolds para el fluido, lo cual nos indica en que régimen se encuentra el fluido a estudiar, generalmente el fluido es laminar cuando  $Re < 2300$ , se considera un



fluido en régimen transitorio cuando  $2300 < Re < 4000$ , y se dice que el fluido es turbulento cuando  $Re > 4000$ , se procede a utilizar las Ecuaciones 1 y 2.

Numero de Reynolds

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad [1]$$

Número de Reynolds según la Norma PDVSA MDP-02-FF-06

$$Re = \frac{\rho_m V D}{\mu_m} \quad [2]$$

Donde:

$\rho$  = Densidad del fluido  $\left( \frac{kg}{m^3} \right)$

$\mu$  = Viscosidad del fluido  $\left( \frac{Kg}{ms} \right)$

$\rho_m$  = Densidad de la slurry  $\left( \frac{kg}{m^3} \right)$

$V$  = Velocidad  $\left( \frac{m}{s} \right)$

$d$  = Diámetro  $(m)$

$\mu_m$  = Viscosidad del slurry  $\left( \frac{Kg}{ms} \right)$

Donde, podemos definir la densidad y viscosidad de la mezcla de la siguiente manera.

Viscosidad de slurry

$$\mu_m = F_{\mu} \cdot \mu \quad [3]$$

Donde:

$\mu_m$  = Viscosidad del slurry  $\left( \frac{Kg}{ms} \right)$

$F_{\mu}$  = Factor de viscosidad relativa (Figura #)

$\mu$  = Viscosidad del fluido  $\left( \frac{Kg}{ms} \right)$

### Densidad del slurry

$$\rho_m = \rho_L(1 - \lambda) + \rho_S\lambda$$

[4]

Donde:

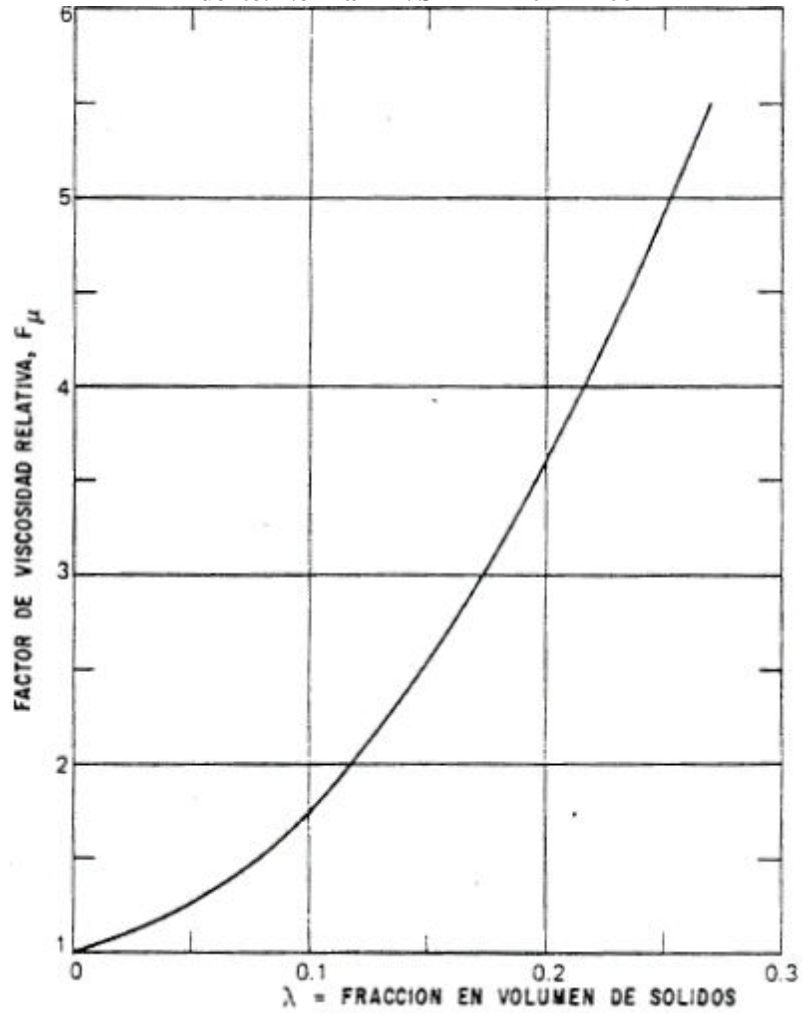
$\rho_m$  = Densidad de la slurry  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$\rho_L$  = Densidad del fluido  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$\rho_S$  = Densidad del solido  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$\lambda$  = Fracción volumétrica del solido en el fluido 20%

Figura 21. Viscosidad relativa de la lechada.  
Fuente: Norma PDVSA MDP-02-FF-06



Luego procedemos a determinar las longitudes de desarrollo con la Ecuación 5 y Ecuación 6 de White, tanto para régimen laminar como turbulento.

- Longitud de desarrollo para régimen laminar

$$L_d = 0.06 \text{Re} D \quad [5]$$

$$\frac{L_d}{D} = 0.06 \text{Re} \quad [6]$$

- Longitud de desarrollo para régimen turbulento

$$L_d = 4.4 \text{Re}^{1/6} D \quad [7]$$

$$\frac{L_d}{D} = 4.4 \text{Re}^{1/6} \quad [8]$$

Donde:

$L_d$  = Longitud de desarrollo ( $m$ )

$D$  = Diámetro ( $m$ )

Re = Reynolds

### 3.9. Longitud de prueba

Para la sección de prueba se debe considerar los equipos e instrumentos a utilizar para la toma de mediciones, también se debe tomar en cuenta los limitantes de espacios que presentamos con la estructura ya prevista para utilizaren dicho proyecto, es por esto que se toma una longitud de prueba de 1 metro. Teniendo suficiente espacio para instalas las tomas de presiones y teniendo una sección de visualización fabricada en material acrílico, para distinguir el comportamiento de esta mezcla bifásica. La cual se muestra en la Figura 22.

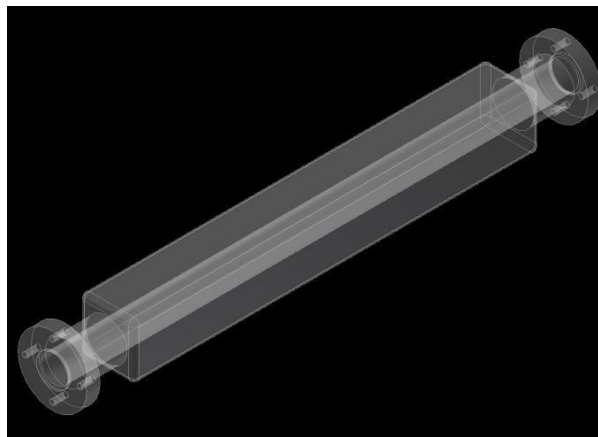
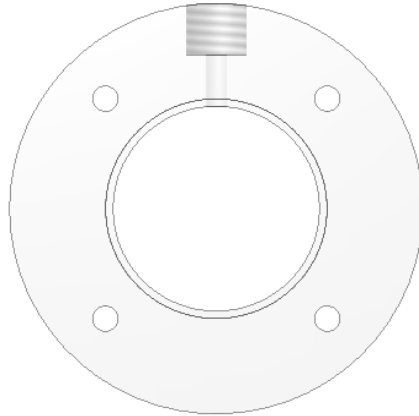


Figura 22. Zona de visualización

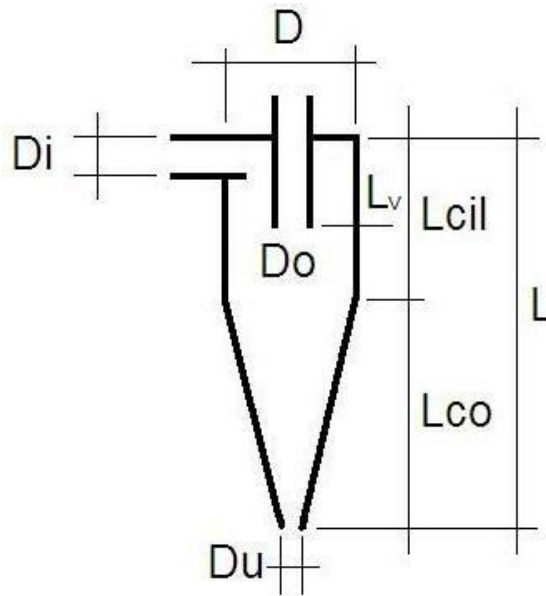
Aunado a la sección de visualización, se colocaran dos tomas de presiones antes y después de la pieza acrílica, la cual permitirá observar el comportamiento del fluido por esta zona, en la Figura 23, se observa la pieza de acrílico la cual tendrá las tomas de presiones de la sección de prueba.



**Figura 23. Toma de presión del circuito**

### **3.10. Sección de separación**

Luego de realizar una investigación bibliográfica sobre separación de fluidos líquido-sólido y por recomendaciones de personal experto en las instalaciones de PDVSA-INTEVEP, se recomienda utilizar un dispositivo de separación ciclónico (también llamado Hidrociclón), ya que estos mecanismos son más eficientes al momento de requerir una separación líquido-sólido en comparación con un separador convencional (separador vertical) el cual la separación es mucho más lenta y al ser equipos muy grandes esto no convendría utilizarlo en dicho diseño por las limitaciones de espacio que se poseen en este proyecto.



**Figura 24. Geometría de un hidrociclón convencional**

Por ello para realizar el dimensionamiento de un hidrociclón se utiliza los mecanismos de cálculos de Cáliz, Márquez y Álvarez (2007) para el dimensionamiento de un mecanismo de separación ciclónico, en la cual hacen uso de la metodología presentada por Rietema (1961) por ser una metodología mecanicista adecuada para el diseño y dimensionamiento de este tipo de dispositivos, a continuación se muestra la metodología empleada para dimensionar un hidrociclón, el cual se ilustra en la Figura 18:

Para dimensionar un separador ciclónico de fondo cónico primero debemos calcular en número de Reynolds en la entrada del ciclón.

$$Re_{inlet} = \frac{d^2 \cdot \Delta\rho \cdot \Delta P}{\eta^2} \quad [9]$$

Donde:

$Re_{inlet}$  = Reynolds en la entrada

$d$  = Diámetro de la partícula (m)

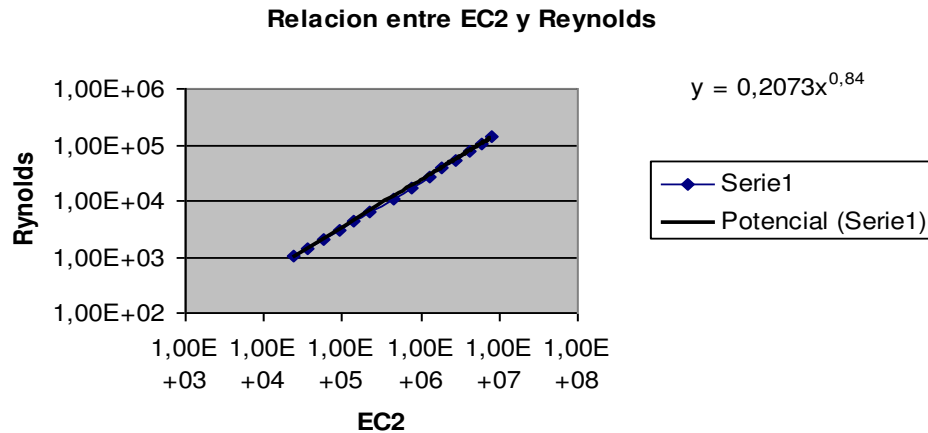
$\Delta\rho$  = Diferencia de densidad entre el sólido y el líquido ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

$\Delta P$  = Caída de presión de operación (Pa)

$\eta$  = Viscosidad del líquido ( $\text{Kg}/\text{ms}$ )

Luego de haber calculado el número de Reynolds, procedemos a calcular un valor adimensional llamado EC2 representado en la Ecuación 10, la cual proviene de la curva que se puede visualizar en la Figura 25.

$$y = 0.2073 \cdot x^{0.84} \quad [10]$$



**Figura 25.** Relación entre la ecuación EC2 y el número de Reynolds en la entrada según Rietema

Esta curva representa una tendencia entre EC2 en función del Reynolds, donde este se representa de la siguiente manera:

$$y = \text{Re}_{inlet}$$

$$x = EC2$$

Luego de haber calculado el numero adimensional EC2, procedemos a determinar el diámetro del hidrociclón.

$$EC2 = \frac{D}{b} \cdot \text{Re}_{inlet} \cdot \sqrt{\frac{G}{2}} = D \cdot \frac{\rho}{\eta} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad [11]$$

De donde despejamos D y obtenemos:

$$D = \frac{EC2}{\frac{\rho}{\eta} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}} \quad [12]$$

Donde:

$EC2$  = Número adimensional

$D$  = Diámetro del hidrociclón ( $m$ )

$b$  = Diámetro de la entrada ( $m$ )

$\rho$  = Densidad del líquido  $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

$G$  = Factor de caída de presión ( $Pa$ )

$\eta$  = Viscosidad del líquido  $\left(\frac{kg}{ms}\right)$

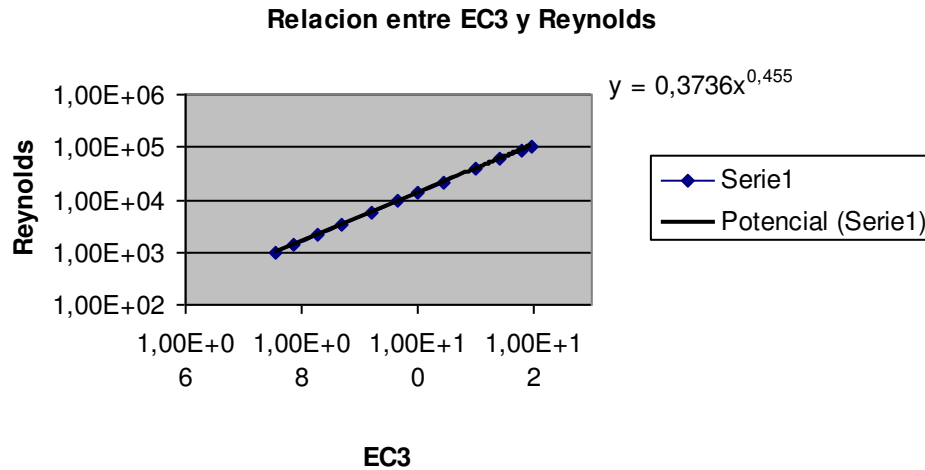
$\Delta P$  = Caída de presión de operación ( $Pa$ )

Seguidamente, se calcula el caudal del flujo volumétrico que entra al hidrociclón, una vez que se obtiene el segundo valor adimensional EC3, obtenido de la Ecuación 13, proveniente de la curva caracterizada en la Figura 26.



$$y = 0.3736 \cdot x^{0.455}$$

[13]



Fuente: Cáliz et al (2007)

**Figura 26. Relación entre la ecuación EC3 y el número de Reynolds en la entrada según Rietema**

Igualmente que la ecuación de EC2, la ecuación de EC3 es una relación con el número de Reynolds en la entrada, como puede apreciarse a continuación:

$$y = EC3$$

$$x = Re_{inlet}$$

Posteriormente al haber calculado EC3, procedemos a realizar el cálculo del caudal volumétrico en la entrada de ciclón.

$$EC3 = \frac{\Pi}{4} \cdot (Re_{inlet})^2 \cdot \sqrt{\frac{G}{2}} = q \cdot \left( \frac{\rho}{\eta} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \right) \quad [14]$$

De donde despejamos q, y obtenemos:

$$q = \frac{EC3}{\left( \frac{\rho}{\eta} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}} \quad [15]$$

Donde:

$EC3$  = Número adimensional

$\rho$  = Densidad del líquido  $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

$G$  = Factor de caída de presión ( $Pa$ )

$\eta$  = Viscosidad del líquido  $\left(\frac{kg}{ms}\right)$

$\Delta P$  = Caída de presión de operación ( $Pa$ )

$q$  = Caudal de la mezcla de flujo a la entrada del hidrociclón  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

Luego de haber calculado el diámetro del hidrociclón procedemos a dimensionar los demás parámetros según la Tabla 13, utilizando los valores planteados por Rietema.

**Tabla 13. Factores para dimensionar un hidrociclón**  
Fuente: Cáliz et al (2007)

	<b>L/D</b>	<b>Di/D</b>	<b>Do/D</b>	<b>Lv/D</b>	<b><math>\theta</math></b>
Rietema	5	0,28	0,34	0,4	20
Bradley	6,85	0,133	0,2	0,33	9
Krebs	3,47	0,33	0,33	0,67	-
Demco 4H	3,3	0,26	0,33	0,55	18

Como es sabido, los hidrociclones no son totalmente efectivos, es decir que al realizar esta pre-separación en este dispositivo el líquido tendrá una pequeña porción de partículas sólidas, es por esto, que en el tanque de fondo cónico se realiza una segunda fase de separación por efectos de la gravedad dejando que esta porción de sedimentos sólidos que fueron arrastrados por el líquido en el hidrociclón decante hacia el fondo del tanque y luego realizar la limpieza de dichos fluidos.

### 3.11. Base reclinable

Para la selección de la base reclinable se realiza un tormenta de ideas entre un grupo de personas familiarizadas con el proyecto, en la cual se exponen todas las ideas en las que dicha sección puede tomar forma. A continuación en la Figura 27 se visualizan las ideas aportadas en esta actividad.

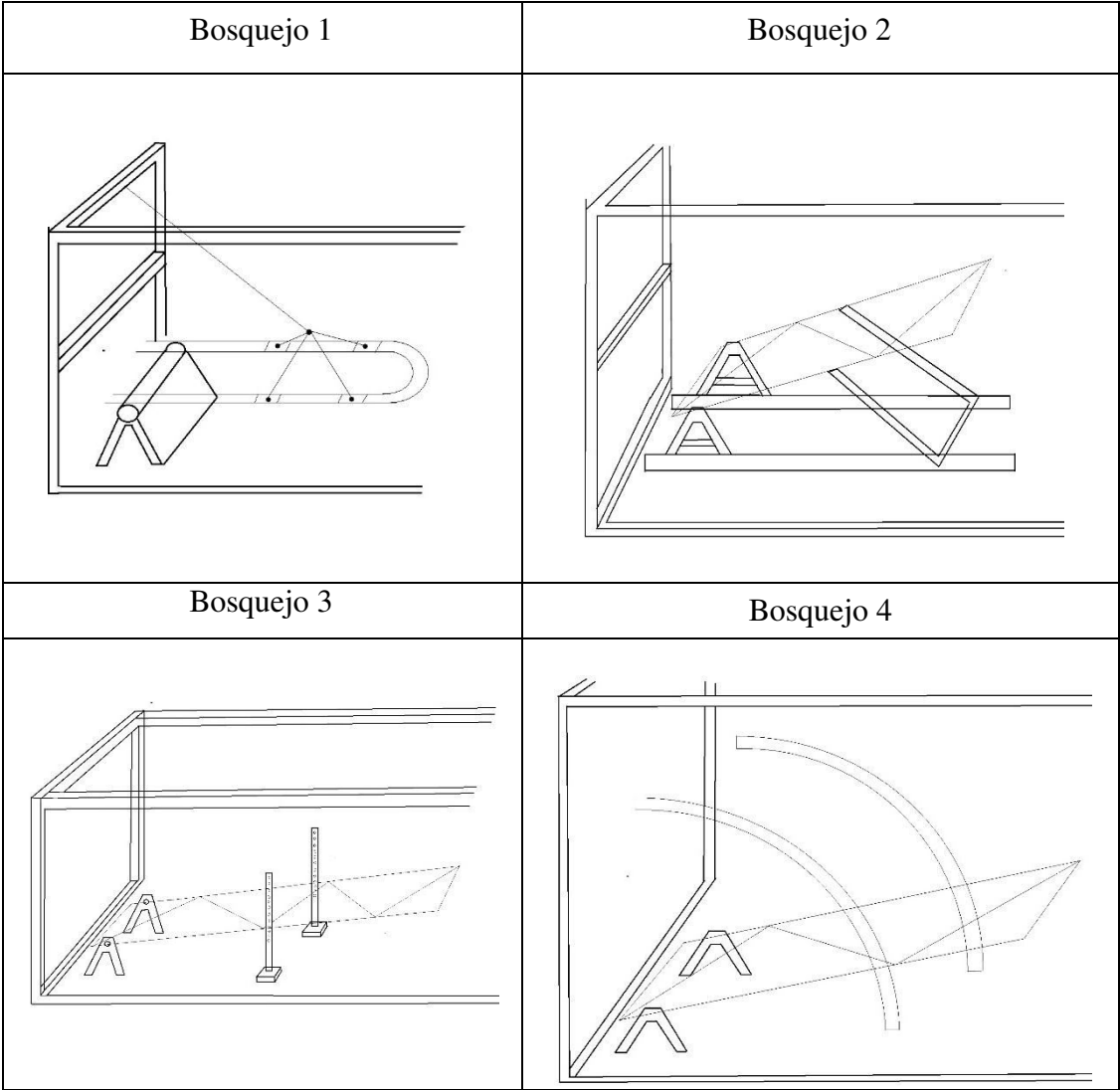


Figura 27. Bosquejos de la tormenta de ideas de la base reclinable

Luego de emplear este mecanismo de tormenta de ideas, se procede a realizar un descarte mediante unos criterios ponderados (Matriz de selección) como se observa en la Tabla 14, en función de los requisitos y criterios de espacio en el marco estructural el cual se basa este diseño. Asignando una ponderación del 1 al 5 (el cual 1 es menos importante y 5 más importante), con una clasificación del 1 al 5 (donde 1 es muy mala y 5 muy buena).

**Tabla 14. Matriz de selección de la base reclinable**

Criterios	Pond.	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3		Modelo 4	
		Clasif.	Pun.	Clasif.	Pun.	Clasif.	Pun.	Clasif.	Pun.
EspD.	5	4	20	4	20	2	10	3	15
Rig.	5	4	20	5	25	3	15	4	20
Ang.	4	3	12	5	20	4	16	5	20
Ubic.	3	2	6	3	9	4	12	4	12
FaConst.	3	5	15	4	12	4	12	5	15
Total		73		86		65		82	
Selección		3		1		4		2	

Espacio disponible	EspD.
Rigidez	Rig.
Angulo de inclinación	Ang.
Ubicación	Ubic.
Facil construcción	FaConst.
Ponderación	Pond.
Clasificación	Clasif.
Puntuación	Pun.
Modelo	Mod.

### 3.12. Sección de prueba

Para la sección de prueba es deseable la versatilidad del banco de pruebas, ya que dicho tramo está vinculado con el soporte reclinable y como se propone la inclinación de esta sección entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , la tubería debería tener una sección ascendente y otra descendente lo cual permitirá realizar pruebas en cualquiera de estas configuraciones.

### 3.13. Unión de la sección de prueba

Como es sabido, este diseño conceptual propone la inclinación de la sección de prueba, y nos referimos a la unión de la sección de prueba, con el nexos que tiene dicha tubería con la tubería que procede de la descarga de la bomba, así como se logra observar en la Figura 28.



**Figura 28. Sección de unión de la tubería de reclinable**

Ya conociendo a que sección se refiere y como se menciona anteriormente dicha sección será de una inclinación variable es por esto que se requiere de una unión flexible entre estos dos puntos de manera de facilitar el manejo del circuito en cuanto a ubicar la inclinación necesaria para las pruebas a realizar, de tal manera, se debe colocar una manguera de alta presión para dicha facilidad de operación.

### 3.14. Instrumentación y accesorios

Ya una vez obtenido todo los parámetros y dimensiones de construcción del banco de pruebas, se procede a ubicar los accesorios de sujeción de la tubería lo cual, además de sujetar la tubería a la sección reclinable, minimizara las vibraciones que puedan ocurrir en el sistema y así afectar las mediciones realizadas. Igualmente al culminar esta ubicación de los sujetadores, se deben seleccionar y ubicar los instrumentos de medición.

## CAPITULO IV

### 4. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

#### 4.1. Requerimientos de espacio

En este diseño de circuito multifásico se propone que la sección de prueba tenga una base reclinable con ángulos entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  con respecto a la horizontal, es por esto que se plantea modificar parte del techo de esta estructura para poder cumplir con esta condición y que también la tubería posea la mayor longitud de desarrollo y pruebas posible para estas dimensiones. Las modificaciones propuestas se podrán observar en la Figura 29, donde se realiza un corte en el techo de la estructura para luego ubicarla un tramo de tubería en dirección del eje X.

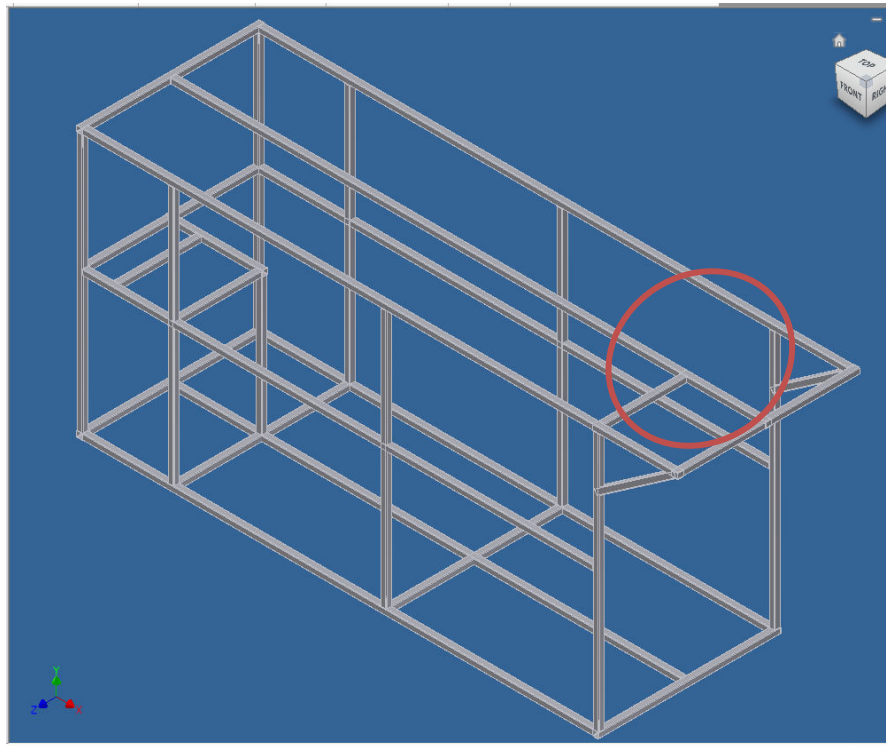


Figura 29. Estructura del circuito modificado

Al realizar estas modificaciones se puede comprometer la estabilidad de la estructura, es por esto, que se realiza un análisis de esfuerzos en el software Inventor lo cual genera los siguientes resultados.

#### 4.2. Longitud de desarrollo

Luego de aplicar la metodología expuesta en capítulo anterior para el cálculo de la longitud de desarrollo, procedemos a realizar los cálculos permitentes a esta área. Al aplicar la ecuación # del cálculo de numero de Reynolds para los fluidos a utilizar, esto nos arroja los resultados mostrados en la Tabla 15 y Tabla 16.

**Tabla 15. Numero de Reynolds multifásico según Norma PDVSA MDP-02-FF-06 para tubería de 2 pulgadas.**

Temperatura	Re 2" Reynolds	Régimen
<b>Aceite Mineral PUROLUB 321</b>		
20°C (68°F)	15	Laminar
40°C (104°F)	46	Laminar
<b>Aceite Mineral PUROLUB 220</b>		
20°C (68°F)	24	Laminar
40°C (104°F)	67	Laminar
<b>Aceite Mineral PUROLUB 150</b>		
20°C (68°F)	37	Laminar
40°C (104°F)	99	Laminar
<b>Aceite Mineral PUROLUB 46</b>		
20°C (68°F)	148	Laminar
40°C (104°F)	324	Laminar
<b>Agua</b>		
20°C (68°F)	14337	Turbulento
40°C (104°F)	218699	Turbulento

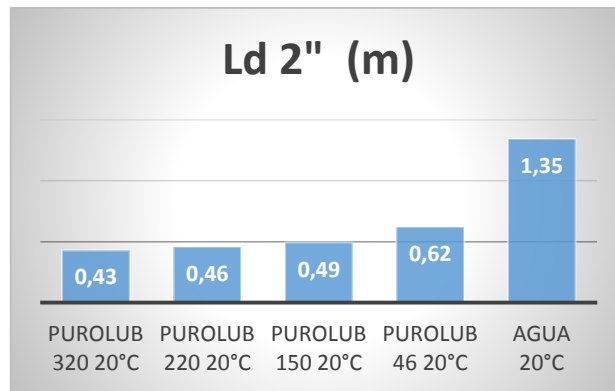
**Tabla 16. Número de Reynolds para tuberías de 2 pulgadas.**

Temperatura	Re 2" Reynolds	Régimen
<b>Aceite Mineral PUROLUB 320</b>		
20°C (68°F)	50	Laminar
40°C (104°F)	149	Laminar
<b>Aceite Mineral PUROLUB 220</b>		
20°C (68°F)	77	Laminar
40°C (104°F)	217	Laminar
<b>Aceite Mineral PUROLUB 150</b>		
20°C (68°F)	118	Laminar
40°C (104°F)	318	Laminar
<b>Aceite Mineral PUROLUB 46</b>		
20°C (68°F)	471	Laminar
40°C (104°F)	1035	Laminar
<b>Agua</b>		
20°C (68°F)	47526	Turbulento
40°C (104°F)	723433	Turbulento

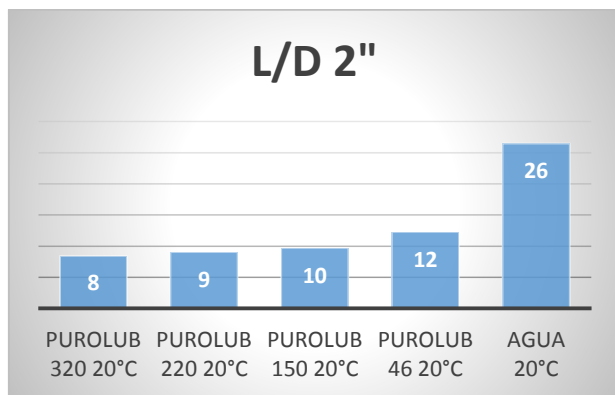
Como se logra observar, dependiendo de la temperatura del fluido este se encuentra en régimen laminar o turbulento, luego de verificar el número de Reynolds por ambos procedimientos, se decide utilizar los valores de la Tabla 16 que son los cálculos de número de Reynolds para flujo monofásico, ya que estos valores adimensionales dan mayor a los cálculos que se realizan por la norma PDVSA que se observan en la Tabla 15, ahora se procede a determinar las longitudes de desarrollo con las ecuaciones planteadas por White en régimen turbulento, se aplican esta ecuación tanto al flujo laminar como turbulento, siguiendo las afirmaciones realizadas por Beattie (1982) y García (2004) la cual nos indica que la longitud de desarrollo de un flujo bifásico se pueden aproximar a la longitud de desarrollo de un flujo monofásico en régimen turbulento.

Aplicando esta ecuación, podemos observar en la Figura 31, Figura 32 y Figura 33 los diferentes valores de la relación L/D para todos los fluidos de operación propuestos.

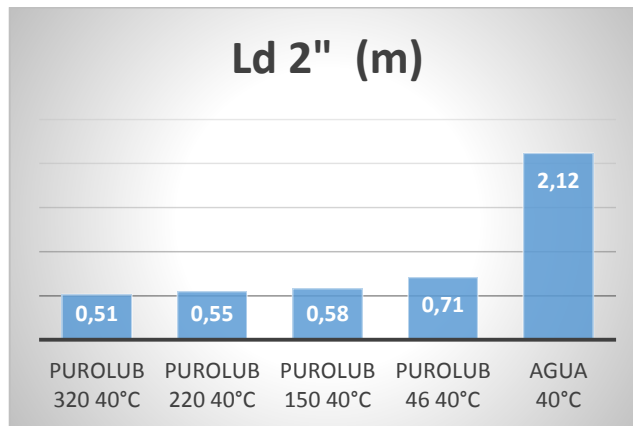




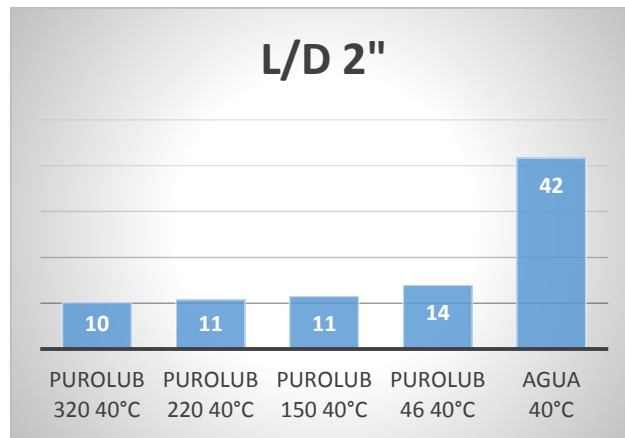
**Figura 30. Longitud de desarrollo para tubería de 2" a 20°C**



**Figura 31. Relación L/D para tuberías de 2" a 20°C**



**Figura 32. Longitud de desarrollo para tuberías de 2" a 40°C**



**Figura 33. Relación L/D para tuberías de 2" a 40°C**

Al llevar a cabo estos cálculos, podemos observar algunas variaciones en cuanto a la longitud necesaria para que el perfil de fluido este completamente desarrollado, por esto se define una longitud de 2 metros, definiéndola así principalmente por las limitaciones de espacio que presentamos en la estructura y tomando en cuenta todas las comparaciones de criterio realizadas en el capítulo anterior, también se debe dejar una distancia necesaria para realizar las mediciones necesarias. Al realizar la relación L/D del diseño de este banco de pruebas podemos observar que esta nos da lo siguiente.

$$\frac{L}{D} = 39$$

Se puede observar al ver esta relación y las gráficas anteriores que los fluidos planteados cumplen con una longitud de desarrollo antes de los 2 metros planteados, a excepción de agua a 40°C el cual su longitud de desarrollo se alcanza a los 2,12 metros, por consiguiente este es el único fluido a esta temperatura el cual no se puede trabajar en dicho banco de pruebas.

### 4.3. Sección de mezcla

Este dispositivo mezclador es de forma de hélice de acero inoxidable y es propulsado mediante un motor eléctrico capaz de realizar el movimiento giratorio de la hélice y de esta manera poder homogeneizar la mezcla que se encuentre en el tanque de almacenamiento. A continuación en la Figura 34 se puede ilustrar la hélice que ira acoplada al motor eléctrico, esta deberá estar ubicada en la parte superior del tanque.



**Figura 34. Dispositivo mezclador**

Una vez seleccionado el tipo de mecanismo que realizara la mezcla de las fases, se procede a seleccionar el motor eléctrico necesario para realizare esta operación. Primeramente hay que saber que el porcentaje de sólidos en el líquido debe ser bajo, ya que al ser un banco de pruebas a pequeña escala este debe ser seguro para los operadores y al tener alta concentración de sólidos los taponamientos serán mayores generando mayores riesgos de operación. Al haber aclarado este punto y al tener baja concentración de sólidos el motor requerido para realizar la mezcla podrá ser de 0.5 HP, obteniendo la fuerza necesaria para realizar el movimiento a la mezcla y homogeneizarla para luego, ser propulsada mediante una bomba de manejo de sólidos al circuito de pruebas.

A continuación en la Figura 35 se muestra el ensamblaje del tanque de almacenamiento, mezclador y motor.

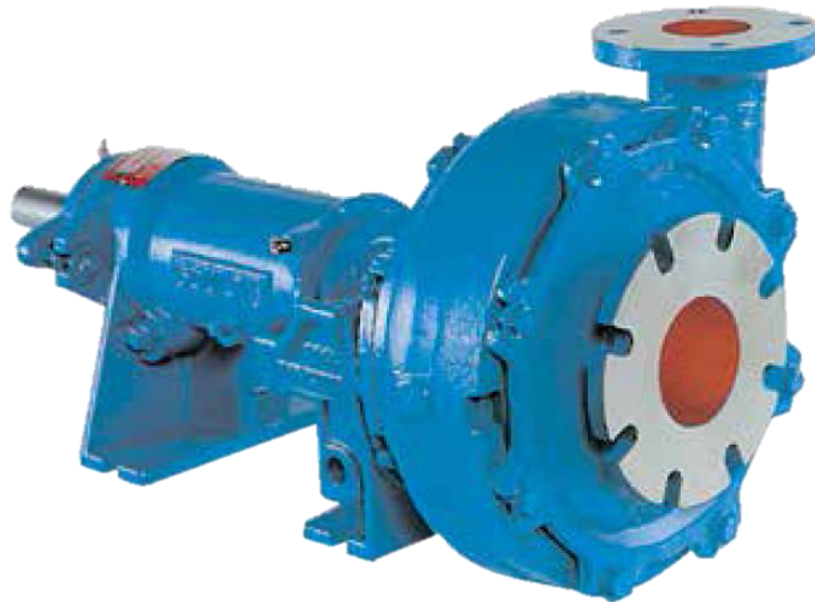


**Figura 35. Ensamblaje tanque-mezclador**

#### **4.4. Suministro de la mezcla: Selección de la bomba**

Como se mencionó anteriormente la mezcla de las partículas sólidas con el líquido se harán mediante un mezclador en el interior del tanque, es por esto, que se necesita un bomba especial de manejo de sólidos como lo son llamado en la industria *Bombas de Slurry*, de tal manera procedemos a seleccionar el tipo de bomba que se debe utilizar para el bombeo de la mezcla.

- Bomba de disco marca Goulds JC.
- Modelo JC  $1 \times 1\frac{1}{2} - 8$
- Caudal máximo de 80 GPM ( $18 \text{ m}^3/\text{h}$ )
- Cabezal hasta 65 pies (20 m)
- Temperatura máxima 250°F (121°C)
- Presión máxima 110 psig (758 kPa)
- Sólidos esféricos hasta 0,5 pulgadas (12 mm)



**Figura 36. Bomba de slurry marca Goulds**

Esta bomba de majo de partículas sólidas debe ser impulsada por un motor eléctrico con un variador de frecuencia para controlar el caudal suministrado al circuito. Todo el conjunto acoplado (bomba y motor eléctrico) debe estar montado en base metálica auto soportante fijada al suelo del laboratorio, la misma debe de ubicarse fuera de la estructura metálica donde basa el diseño de este proyecto, con la finalidad de evitar las vibraciones producidas por dicho equipo, y de esta manera evitar las malas lecturas de los equipos e instrumentos de medición.

#### **4.5. Caudales de mínimo y máximo de operación**

Para el caudal máximo de operación usamos como patrón a seguir los casos de otros circuitos con un diámetro similar al de este diseño conceptual, por ejemplo, tenemos el caso de Gómez (2005) el cual utiliza un caudal de líquido máximo de 30 gpm, otro caso que podemos referenciar es el del instituto SINTEF el cual podemos observar que en su circuito de pequeña escala de tuberías de 1 y 2 pulgadas utilizan un caudal máximo de operación de 22 gpm. De esta manera, por ser un circuito experimental de

diámetros similares a los circuitos antes nombrados, y para suministrar un factor de seguridad para los equipos fijamos un caudal máximo de operación de 26 gpm

Por otra parte, también se debe determinar el caudal mínimo de operación del circuito, como es sabido el circuito operara con partículas sólidas, es por esto, que el caudal mínimo que debe operar este banco de pruebas es aquel donde la velocidad del líquido sea mayor a la velocidad critica de sedimentación de las partículas sólidas a fin de prevenir la sedimentación de dichas partículas en la tubería lo que podría ocasionar deterioro en la misma.

El caudal mínimo de operación se establece en 6 GPM, ya teniendo el caudal mínimo de operación procedemos a realizar el cálculo de la velocidad mínima. Para calcular la velocidad del fluido utilizamos la siguiente ecuación:

$$Q = V \cdot A \quad [16]$$

$$V = \frac{Q}{A} \quad [17]$$

$$V_{min} = 0,1867 \text{ m/s}$$

### **Velocidad de sedimentación**

Por sedimentación entendemos que es el proceso mediante los sólidos suspendidos en el fluido se asientan, por acción de la gravedad.

La velocidad de sedimentación es la velocidad lineal más baja en la tubería a la cual no se acumularan sólidos en el fondo. A velocidades por debajo de esta, estos se acumularan ocasionando un aumento en la caída de presión en el sistema, y así, generando un mayor costo de mantenimiento y operación. Es por esta razón que procedemos a realizar el cálculo de esta velocidad.

La velocidad de sedimentación es conocida como la Ley de Newton de la sedimentación y se puede expresar como:

$$V_s = \sqrt{\frac{4g(\rho_s - \rho)d_p}{3C_d\rho}} \quad [18]$$

De tal manera, procedemos a calcular el valor de  $C_d$ , el cual es función del número de Reynolds.

- Para  $Re > 2 \times 10^3$   $C_d = 0,4$
- Para  $0,5 < Re < 2 \times 10^3$   $C_d = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34$
- Para  $Re < 0,5$   $C_d = \frac{24}{Re}$

**Tabla 17. Numero de Reynolds para tubería de 2"**

Fluido	Temperatura	Re 2"
Aceite PUROLUB 320	20°C (68°F)	2
	40°C (104°F)	7
Aceite PUROLUB 220	20°C (68°F)	4
	40°C (104°F)	11
Aceite PUROLUB 150	20°C (68°F)	6
	40°C (104°F)	16
Aceite PUROLUB 46	20°C (68°F)	23
	40°C (104°F)	51
Agua	20°C (68°F)	2264
	40°C (104°F)	34531

Utilizando los valores de Reynolds de la Tabla 17 los cuales son calculados a la menor velocidad del fluido, procedemos a calcular mediante una hoja de cálculo el valor de  $C_d$ , una vez obtenido dicho valor procedemos a calcular el valor de  $V_s$  según la Ley de Newton para la sedimentación. Se realiza el cálculo para cada valor de Re por la necesidad de saber el valor de la velocidad de sedimentación para cada tipo de fluido a utilizar en el circuito.

A continuación, en la Tabla 18, se ilustra los valores de  $V_s$  obtenidos a partir de las ecuaciones anteriormente expuestas.

**Tabla 18. Velocidad de sedimentación en tubería de 2"**

Fluido	Temperatura	$V_s$	$V_l$
Aceite	20°C (68°F)	0,04432177	0,19
PUROLUB 320	40°C (104°F)	0,07142822	0,19
Aceite	20°C (68°F)	0,05421151	0,19
PUROLUB 220	40°C (104°F)	0,08388061	0,19
Aceite	20°C (68°F)	0,06559339	0,19
PUROLUB 150	40°C (104°F)	0,09780681	0,19
Aceite	20°C (68°F)	0,1150065	0,19
PUROLUB 46	40°C (104°F)	0,14917317	0,19
Agua	20°C (68°F)	0,2053848	0,19
	40°C (104°F)	0,20812126	0,19

Realizando el procedimiento de cálculo de Pérez (2005) anteriormente expuesto se puede observar en la Tabla 18, los valores para la velocidad de fluido en tuberías de 2" es de  $0,19 \text{ m/s}$ , y observando los valores de sedimentación de la partícula se puede argumentar que para ciertos fluidos de operación a un caudal de 6 GPM las partículas sólidas decantarán en el fondo de la tubería debido a que la  $V_s$  es mayor a la  $V_l$ , es por esto que se establece que un caudal mínimo de 8 GPM para cuando se trabaje con agua de manera que los sólidos no decanten en el fondo de la tubería.

#### 4.6. Caída de presión

Para el cálculo de la caída de presión del sistema, se emplea la Ecuación de Bernoulli generalizada para fluidos monofásicos, esta ecuación será aplicada para los fluidos de operación anteriormente planteados para las viscosidades a las distintas temperaturas expuestas.



Como el circuito tendrá un sección de inclinación que llegara hasta 90°, el cálculo de caída de presión del sistema se hará con esta diferencia de altura, ya que sabemos que con este arreglo es donde se presentara la mayor caída de presión en el circuito.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{1V_1^2}{2g} + Z_1 + h_a - h_f - h_r = \frac{P_2}{\rho} + \frac{1V_2^2}{2g} + Z_2 \quad [19]$$

$$\Delta P = \rho(Z_2 - Z_1) + \rho h_f \quad [20]$$

Antes de aplicar la ecuación 20 se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- $h_r = 0$  ya que no existen turbinas en diseño del banco de pruebas.
- $h_a = 0$  ya que el sistema de control se toma después de la descarga de la bomba.
- Las velocidades se cancelan ya que el sistema de control estudiado se hará para el mismo diámetro de 2".
- $Z_1 = 0$  ya que se toma este punto como referencia para la simplificación de la ecuación.

Posterior a plantear la Ecuación de Bernoulli, procedemos a realizar el cálculo por fricción del sistema aplicando la Ecuación de Darcy-Weisback, aplicamos dicha ecuación porque a pesar de ser una de las más aplicadas en la industria, esta puede ser aplicada para cualquier tipo de fluido líquido (fluidos incompresible) y para tuberías de cualquier diámetro y material.

$$h_f = f \frac{L_{eq} V^2}{2Dg} \quad [21]$$

Donde:

$f$  = Factor de fricción

$L_{eq}$  = Longitud equivalente

$V$  = Velocidad

$D$  = Diámetro

$g$  = Gravedad

Para poder aplicar la ecuación de Darcy-Weisback debemos calcular el factor de fricción  $f$ , el cual se puede calcular por medio de la ecuación de Swamee-Jain o por el diagrama de Moody.

Para obtener el factor de fricción se debe primero calcular el número de Reynolds para los distintos fluidos que tenemos. Lugo de haber calculado el número de Reynolds, se debe obtener la rugosidad relativa como se muestra en la siguiente Ecuación 22.

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{\varepsilon}{D} \quad [22]$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0,003$$

Donde:

$\varepsilon$  = Rugosidad absoluta del material.

$D$  = Diámetro de la tubería (m)

La rugosidad absoluta del material se obtiene mediante la Tabla 19. Para el cálculo de este valor tomamos como material acero galvanizado.

**Tabla 19. Rugosidades absolutas de los distintos materiales.**

**Fuente: KSB**

<b>Material</b>	<b><math>\varepsilon</math> (m) – Tubos Nuevos</b>	<b><math>\varepsilon</math> (m) – Tubos Usados</b>
Acero galvanizado	0,00015-0,00020	0,0046
Acero remachado	0,0010-0,0030	0,0060
Acero remachado	0,0004	0,0005-0,0012
Acero soldado	0,00004-0,00006	0,0024
Chumbo	Lisos	Lisos
Cemento amianto	0,000013	-----
Cobre o latón	Lisos	Lisos
Concreto bien acabado	0,003-0,0010	-----
Concreto común	0,0010-0,0020	-----
Hierro forjado	0,00004-0,00006	0,0024
Hierro fundido	0,00025-0,00050	0,0030-0,0050
Madera	0,0002-0,0010	-----
Tubería de desagüe cerámica	0,0006	0,0030
Vidrio	Lisos	Lisos
Plástico	Lisos	Lisos

### **Ecuación de Swamee-Jain**

Luego de haber cálculo el número de Reynolds y la rugosidad relativa, se aplica la siguiente ecuación.

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad [23]$$
$$f = 0,003$$

Donde:

$\varepsilon/D$  = Rugosidad relativa

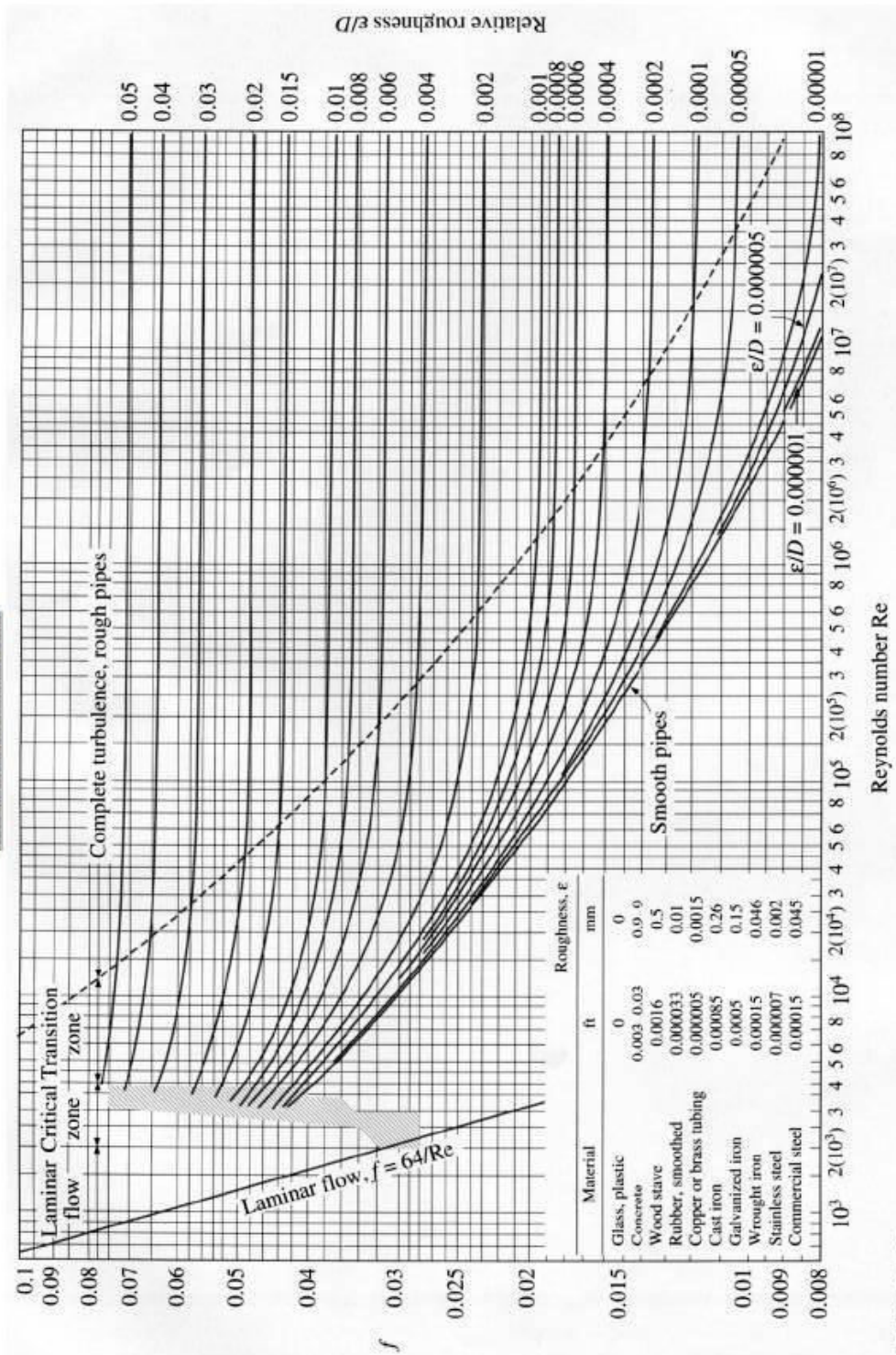
$f$  = Factor de fricción

$Re$  = Reynolds

### **Diagrama de Moody**

Para realizar el cálculo del factor de fracción por medio del diagrama de Moody, al igual que por el método de Swamee-Jain, se calcula el número de Reynolds y la rugosidad relativa. Luego de ya obtenidos estos valore procedemos a ubicarnos en laFigura 37.

**Diagrama de Moody**



**Figura 37. Diagrama de Moody**

Posterior a calcular el valor de  $f$ , procedemos a realizar el cálculo de la longitud equivalente.

$$L_{eq} = L_{tub} + L_{acc} \quad [24]$$




















Donde:

$L_{eq}$  = Longitud equivalente (m)

$L_{tub}$  = Longitud de tubería (m)

$L_{acc}$  = Longitud de accesorios (m)

Para calcular la longitud de los accesorios utilizamos la Figura 38 y Figura 39.

DIAMETRO D		Largos equivalentes para pérdidas de carga localizadas. (Expresado en metros de tubería recta)*																		
		 CODO 90° CURVA LARGA	 CODO 90° CURVA MEDIA	 CODO 90° CURVA CORTA	 CODO 45°	 CURVA 90° R/D - 1 1/2	 CURVA 90° R/D - 1	 CURVA 45°	 ENTRADA NORMAL	 ENTRADA EXTENDIDA	 VALVULA DE CORTE ABIERTA	 VALVULA DE GLOBO ABIERTA	 VALVULA DE GLOBO EN ANGULO ABIERTA	 TEE CON PASAJE DIRECTO	 TEE CON SALIDA LATERAL	 TEE CON SALIDA BILATERAL	 VALVULA DE PIE Y FILTRO	 SALIDA CANALIZACIÓN	 VALVULA DE RETENCION TIPO BOLA	 VALVULA DE GRIFOS TIPO CHAPALETA
mm	pulg																			
13	½	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,6
19	¾	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4
25	1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2
32	1 ¼	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0
38	1 ½	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,8
50	2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4
63	2 ½	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7
100	4	2,1	2,8	3,4	1,3	1,3	1,6	0,7	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	6,4	12,9
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,0	2,1	0,9	2,0	4,0	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1
150	6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	2,5	5,0	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	5,0	12,5	19,3
200	8	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,5	3,5	6,0	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,0	25,0
250	10	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	1,8	4,5	7,5	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0	65,0	7,5	20,0	32,0
300	12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	5,5	9,0	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	9,0	24,0	38,0
350	14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	6,2	11,0	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	45,0

Los valores indicados para válvulas de globo, también se aplican a grifos, válvulas de duchas y válvulas de descarga.

Figura 38. Largos equivalentes para las pérdidas localizadas.

Fuente: KSB

DIAMETRO INTERNO (m.m.)	CURVA 90° R-3D	CURVA 90° R-2D	CODO	TE	MANGUERA R-100	DIAFRAGMA ABIERTA	MANQUITO	MACHO PASO RECTO	TECH TAYLOR
LONGITUD EQUIVALENTE EN m DE TUBO RECTO DE IGUAL RESISTENCIA AL FLUJO.									
25	0.52	0.70	0.82	1.77	0.30	2.56	—	0.37	—
32	0.73	0.91	1.13	2.38	0.40	3.29	—	0.49	—
40	0.85	1.10	1.31	2.74	0.49	3.44	1.19	0.58	—
50	1.07	1.40	1.68	3.35	0.55	3.66	1.43	0.73	—
63	1.28	1.65	1.98	4.27	0.70	4.60	1.52	0.85	—
80	1.55	2.07	2.47	5.18	0.85	4.86	1.92	1.04	0.20
90	1.83	2.44	2.90	5.79	1.01	—	—	1.22	—
100	2.13	2.77	3.35	6.71	1.16	7.82	2.19	1.40	0.23
115	2.41	3.05	3.66	7.32	1.28	—	—	1.58	—
125	2.71	3.66	4.27	8.23	1.43	13.11	3.05	1.77	0.30
150	3.35	4.27	4.88	10.06	1.55	18.29	3.11	2.13	0.37
200	4.27	5.49	6.40	13.11	2.41	19.81	7.92	2.74	0.82
250	5.18	6.71	7.92	17.07	2.99	21.34	10.67	3.47	0.61
300	6.10	7.92	9.75	20.12	3.35	28.96	15.85	4.08	0.76
350	7.01	9.45	10.97	23.16	4.27	28.96	—	4.88	0.91
400	8.23	10.67	12.80	26.52	4.86	—	—	5.49	1.04
450	9.14	12.19	14.02	30.48	5.49	—	—	6.22	1.16
500	10.36	13.11	15.85	33.53	6.10	—	—	7.32	1.25

NOTA: PARA CURVA 135° USAR VALOR CURVA 90° x 1.5

FIG. 17. LONGITUDES EQUIVALENTES DE SINGULARIDADES EN TUBOS

Fuente internet

Figura 39. Longitudes equivalentes de singularidades en tubos

Mediante una hoja de cálculo procedemos a realizar los cálculos anteriormente expuestos. Primero se calcula la longitud de los accesorios como se logra muestra en la Tabla 20.

Tabla 20. Longitud de accesorios del circuito

Accesorios	Cantidad	L eq	L acc
Válvulas de bola 2"	4	0,4	1,6
Codos Radio largo 2"	3	1,1	3,3
Curva 90°	2	1,07	2,14
Válvula check 2"	1	1,1	1,1
Conexión universal 2"	6	1,1	6,6
Tee 2" pasaje directo	3	1,1	3,3
Tee 2" salida lateral	1	3,5	3,5
Cantidad total	20	L total	21,54

Una vez obtenido el valor de la longitud de los accesorios, esta se suma a la longitud de la tubería.

$$L_{tub} = 11,51 \text{ m}$$

$$L_{eq} = 33,04 \text{ m}$$

Igualmente con el uso de la herramienta de una hoja de cálculo procedemos a realizar el cálculo de la caída de presión, estos cálculos se realizan como se menciona anteriormente se harán para una diferencia de altura con la configuración de la sección de pruebas inclinada a 90°, igualmente este se hará con el mayor y el menor caudal de operación propuesto para el banco de pruebas.

**Tabla 21. Caída de presión del circuito a un caudal de 6GPM**

<b>Fluidos</b>	<b>Temperatura</b>	<b><math>\Delta P</math> (kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\Delta P</math> (kPa)</b>
PUROLUB 320	20°C (68°F)	18105,52531	177,1892017
	40°C (104°F)	4199,065609	41,09403459
PUROLUB 220	20°C (68°F)	4865,170865	47,61285448
	40°C (104°F)	4101,308279	40,13733529
PUROLUB 150	20°C (68°F)	4256,689772	41,6579718
	40°C (104°F)	4052,121891	39,65597412
PUROLUB 46	20°C (68°F)	3983,866652	38,98799619
	40°C (104°F)	3963,725557	38,79088596
Agua	20°C (68°F)	4506,816503	44,10582985
	40°C (104°F)	4468,923736	43,73499338



**Tabla 22. Caída de presión del circuito a un caudal de 26 GPM**

Fluidos	Temperatura	$\Delta P$ (kg/m <sup>2</sup> )	$\Delta P$ (kPa)
PUROLUB 320	20°C (68°F)	6368,609947	62,32621774
	40°C (104°F)	4924,67979	48,19523686
PUROLUB 220	20°C (68°F)	5510,989422	53,93313918
	40°C (104°F)	4703,575766	46,0314087
PUROLUB 150	20°C (68°F)	5044,9867	49,37261697
	40°C (104°F)	4550,196838	44,53037025
PUROLUB 46	20°C (68°F)	4394,245927	43,00416115
	40°C (104°F)	4261,206069	41,70217041
Agua	20°C (68°F)	4651,100801	45,51786397
	40°C (104°F)	4598,643889	45,00449591

#### 4.7. Sección de separación

Una vez planteada la metodología para el dimensionamiento de un hidrociclón y utilizando los valores de entrada que se muestran en la Tabla 23, se procede a realizar el dimensionamiento del separador dando como resultados los valores de la Tabla 24.

**Tabla 23. Datos de entrada del hidrociclón**

	Datos		Unidades
Presión de operación	P	50000	Pa
<b>Fase Líquida</b>			
Temperatura	T	60	°C
Densidad	$\rho$	875,71	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad	$\eta$	0,0884	kg/m.s
<b>Fase Sólida</b>			
Densidad	$\rho$	1430	kg/m <sup>3</sup>
Tamaño de partícula	$\mu m$	500	(m)
Concentración	%	20	%
<b>Mezcla</b>			
Caudal	q	0,006	m <sup>3</sup> /s

Tabla 24. Dimensiones del hidrociclón según Rietema

Rietema	
D	0,110
L/D	0,5206
Di/D	0,0291
Do/D	0,0354
Lv/D	0,0416
$\theta$	20

#### 4.8. Base reclinable entre 0° y 90°

Como se ha mencionado anteriormente el diseño de este banco de pruebas contemplara una sección de prueba con una variación de la inclinación del mismo, convirtiéndolo en un banco de ensayos muy versátil, ya que, podrá realizar experimentos con una inclinación variable y en flujo ascendente como descendente. Para obtener un buen resultado en el diseño de dicha estructura se necesita ser riguroso con respecto a los cálculos necesarios para el modelado de tal estructura y así tener un factor de seguridad alto en el diseño de dicha estructura.

Este diseño se basa en tres partes principales la cual podemos llamar: cercha o armazón principal, apoyos de la cercha y por último el riel, como se ilustra en la Figura 40.

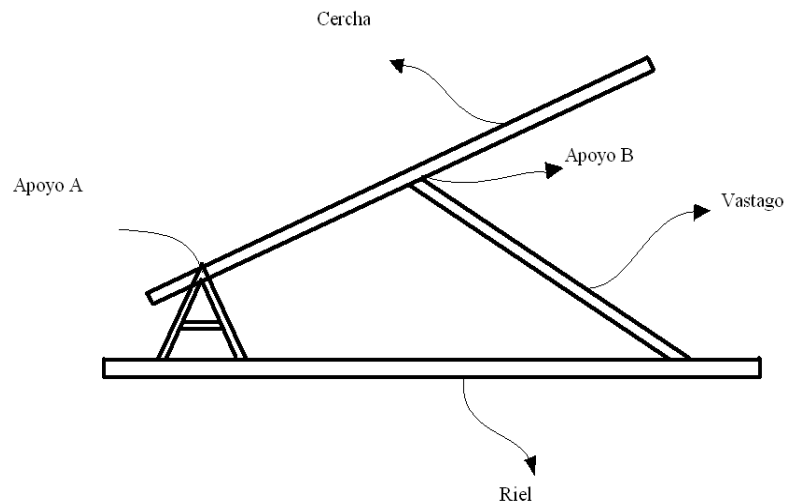


Figura 40. Geometría de la sección reclinable

#### 4.8.1. Peso de la tubería

El peso de la tubería será la carga que debe soportar la cercha, es por esto, que los cálculos realizados para esta parte se harán con la mayor densidad del fluido que estemos trabajando, para esto utilizamos el caso más extremo el cual es la tubería llena completamente de partículas sólidas.

Para calcular el peso de la tubería primero realizamos el cálculo del peso de la tubería sin algún tipo de fluido el cual utilizando la herramienta del Software Inventor de cálculo de unidades físicas se obtuvo un masa aproximada de 27 kilogramos al cual se le suma un masa aproximada de 20 kilogramos, lo que representa los equipos de medición y os accesorios de la tubería, dando un total de 47 kilogramos. A esto se le debe sumar la masa que aporta el fluido de operación, como anteriormente se nombró se tomara el caso más extremo el cual es la tubería llena completamente de material sólido lo cual sobredimensionaría la fuerza aplicada al marco principal.

Calculando la masa del fluido a lo largo de la tubería de obtiene lo siguiente:

$$m_{fluido} = \rho \times V \quad [25]$$

$$m_{fluido} = 81Kg$$

Donde:

$$m_{fluido} = \text{Masa del fluido (Kg)}$$

$$\rho = \text{densidad (Kg/m}^3\text{)}$$

$$V = \text{Volumen (m}^3\text{)}$$

Sumando la masa de la tubería y del fluido tenemos:

$$m = m_{tub} + m_{fluido} \quad [26]$$
$$m = 128Kg$$

Donde:

$$m = \text{Masa total (Kg)}$$

$$m_{tub} = \text{Masa de la tubería (Kg)}$$

$$m_{fluido} = \text{Masa del fluido (Kg)}$$

Luego de haber calculado la masa total, procedemos a calcular el peso que debe soportar la estructura principal.

$$P = m \times g \quad [27]$$
$$P = 1255.6N$$

Donde:

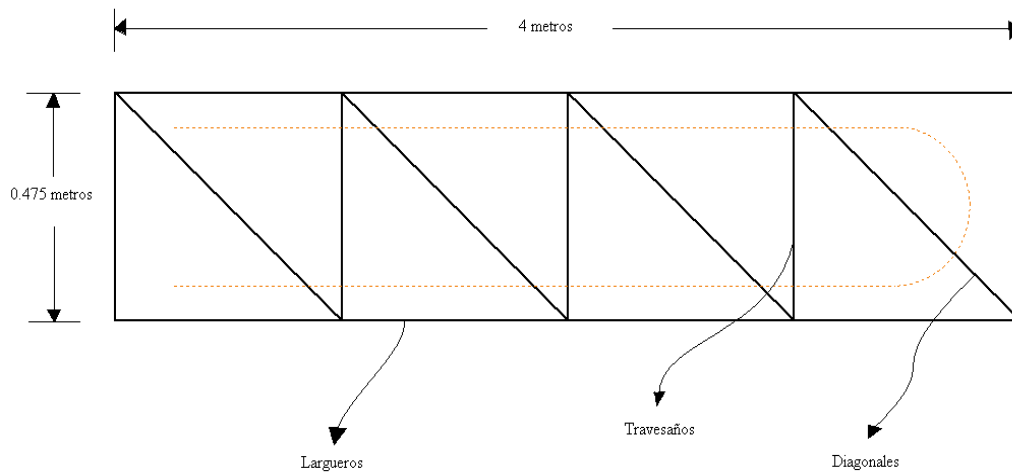
$$P = \text{Peso (N)}$$

$$m = \text{Masa total (Kg)}$$

$$g = \text{Gravedad (m/s}^2\text{)}$$

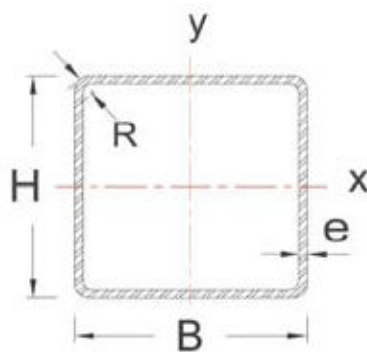
#### 4.8.2. Estructura principal o cercha

Al calcular el peso que soportara la cercha, procedemos a dimensionar el marco principal definiendo unas longitudes de 4 metros de largo por 0.475 metros de ancho como se pueden observar en la Figura 41, este marco está conformado por 3 partes las cuales son: largueros, travesaños y diagonales, estas dos últimas están destinadas a darle la rigidez necesaria a la cercha, lo cual se logra a través de la triangulación de la estructura el cual consiste en generar triángulos en dicho marco, con la finalidad de que este no se deforme, ya que el triángulo es el único polígono que no se deforma al aplicarle una fuerza sobre cualquiera de sus vértices.



**Figura 41. Geometría de la cercha o apoyo principal**

Para definir la cantidad de travesaños y diagonales éstas se ubicaran cada 50 cm generando así 9 travesaños y 8 diagonales. Para este tipo de estructura triangulada se procede a seleccionar un perfil de estructura que aporte la rigidez necesaria y que al mismo tiempo sea lo más liviano posible, ya que se sabe que uno de los objetivos del proyecto es tener una sección que sea reclinable entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .



**Figura 42. Perfil de tubo estructural cuadrado**

**Tabla 25. Propiedades Mecánicas de tubo estructural cuadrado según la Norma ASTM A 500**

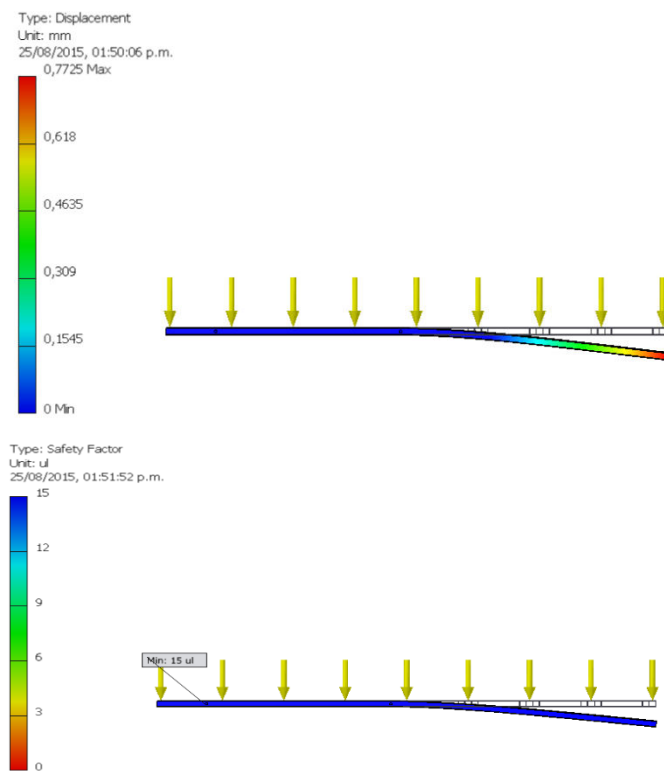
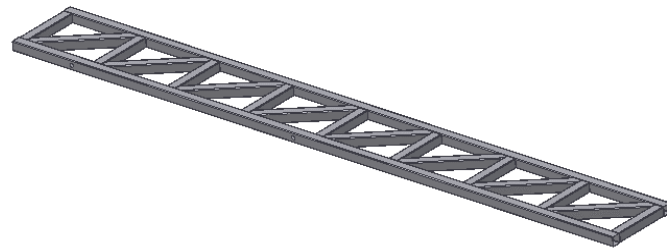
Norma ASTM A 500 Grado del acero	Propiedades Mecánicas (mínimas)				
	Límite de Fluencia Mpa ( $Kg/cm^2$ )	Límite de Fluencia psi	Resistencia a la Tracción Mpa ( $Kg/cm^2$ )	Resistencia a la Tracción psi	% Elong.
A	269 (2.740)	39.000	310 (3.170)	45.000	25
B	317 (3.230)	46.000	400 (4.080)	58.000	23
C	345 (3.515)	50.000	427 (4.360)	62.000	21

**Tabla 26. Propiedades químicas de tubo estructural cuadrado según la Norma ASTM A 500**

Norma ASTM A 500 Grado del acero	Propiedades Químicas (% máximo)			
	C Carbono	Mn Manganeso	P Fósforo	S Azufre
A	0.23	1.35	0.035	0.035
B	0.26	1.35	0.035	0.035
C	0.26	1.35	0.035	0.035

Para esto se selecciona un perfil estructural cuadrado de la norma internacional ASTM A 500 Grado C como se ilustra en la Figura 42, ya que en comparación con una viga estructural de perfil HEA, es mucho más liviana, sus propiedades se pueden observar en la Tabla 25 y Tabla 26. Luego de determinar el tipo de tubo estructural procedemos a seleccionar las dimensiones de dicho tubo cuadrado, el cual revisando catálogos de empresas fabricadoras de este material, seleccionamos el de menor dimensión el cual es 60x60x2.25 con un peso lineal de  $3.94(Kg/m)$ , se decide

utilizar estas medidas principalmente por la necesidad de reducir el área de construcción y las limitantes de espacio de la estructura, posteriormente al seleccionar estas medidas, realizamos un dimensionamiento en Inventor y se realiza un análisis de esfuerzos sometido a las cargas de la Ecuación 27, en una posición horizontal el cual se sabe este estará sometido a una fuerza distribuida por toda la cercha, fijando los apoyos “A” a 400 milímetros del extremo de la cercha y el apoyo “B” a una distancia de 1500 milímetros de “A”, arroja como resultado las siguientes valores que se observan en las Figura 43.



**Figura 43. Análisis de esfuerzos aplicados a la cercha**

En tal sentido, la cercha posee un desplazamiento máximo de 0,77 milímetros y un factor de seguridad mínimo de 15 lo cual podemos observar se encuentra sobredimensionado e indica que la estructura principal está diseñado para soportar mayores cargas a la actual tomando en consideración futuras modificaciones al banco de ensayos.



### 4.8.3. Apoyos

Para los apoyos de la estructura tenemos lo que es el apoyo “A”, el cual es donde el soporte principal tiene el pivote, y el apoyo “B” el cual está fijado al vástago, este último estará patinando sobre un riel el cual permitirá la inclinación de la sección de pruebas. Estos apoyos se pueden observar en la Figura 40.

Posteriormente de ubicar los apoyos “A” y “B”, realizamos el cálculo para dimensionar la longitud del vástago que va soportado en el apoyo B y a los patines, como se logra visualizar en la Figura 44.

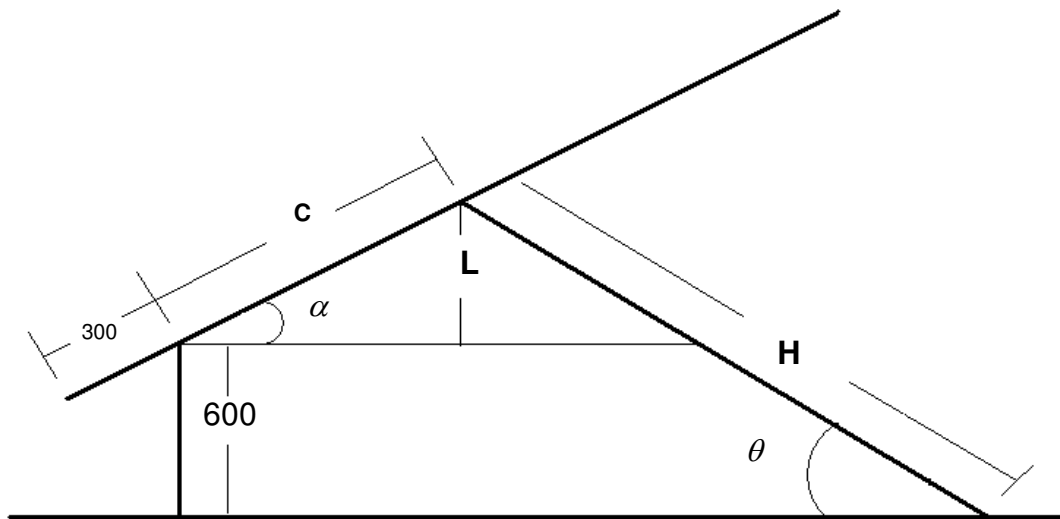


Figura 44. Geometría para calcular la longitud del vástago

Aplicando la una relación entre el ángulo y los catetos y fijando un ángulo de  $\alpha$  de  $45^\circ$ , calculamos el valor de  $L$ . Donde previamente se ha fijado un valor de  $C$  de 1500 milímetros.

$$\text{sen}(\alpha) = \frac{L}{C}$$

$$L = C \times \text{sen}(\alpha) \Rightarrow L = 1500 \text{sen}(45) \Rightarrow L = 1060,6 \text{mm}$$

Al calcular el valor de L procedemos a calcular el valor de H (longitud del vástago).

$$H = \frac{1060,6 + 700}{\text{sen}(\theta)} \Rightarrow H = \frac{1060,6 + 600}{\text{sen}(45)} \Rightarrow H = 2350\text{mm}$$

Ya obtenido el valor de H que es la distancia que representa el vástago, podemos calcular valor de  $\alpha$  para un ángulo de  $\theta = 0^\circ$  y  $\theta = 90^\circ$ , esto se puede visualizar en la Figura 45.

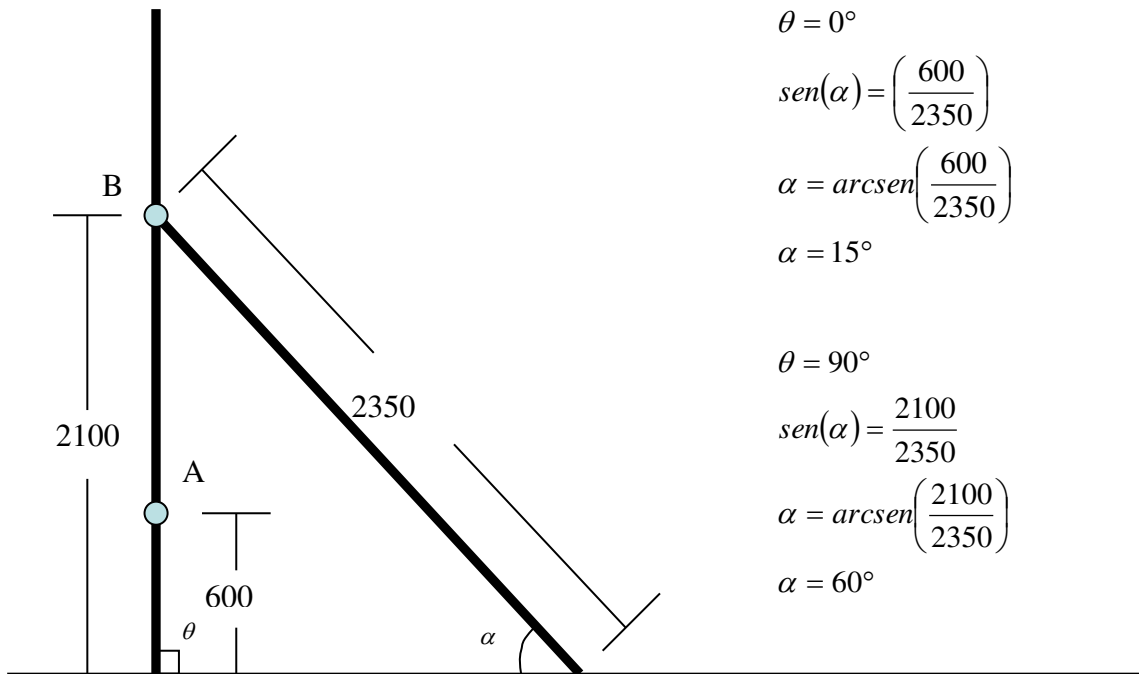


Figura 45. Geometría para calcular el ángulo del vástago

Posteriormente, se realiza el análisis de esfuerzos del apoyo A, dichas fuerzas a la que está sometido este apoyo, fueron calculadas mediante una sumatoria de fuerzas aplicada a dichos soportes. Las cual llamaremos Ra y Rb, en la Figura 46 podrán observar el diagrama de cuerpo libre realizado a la estructura.

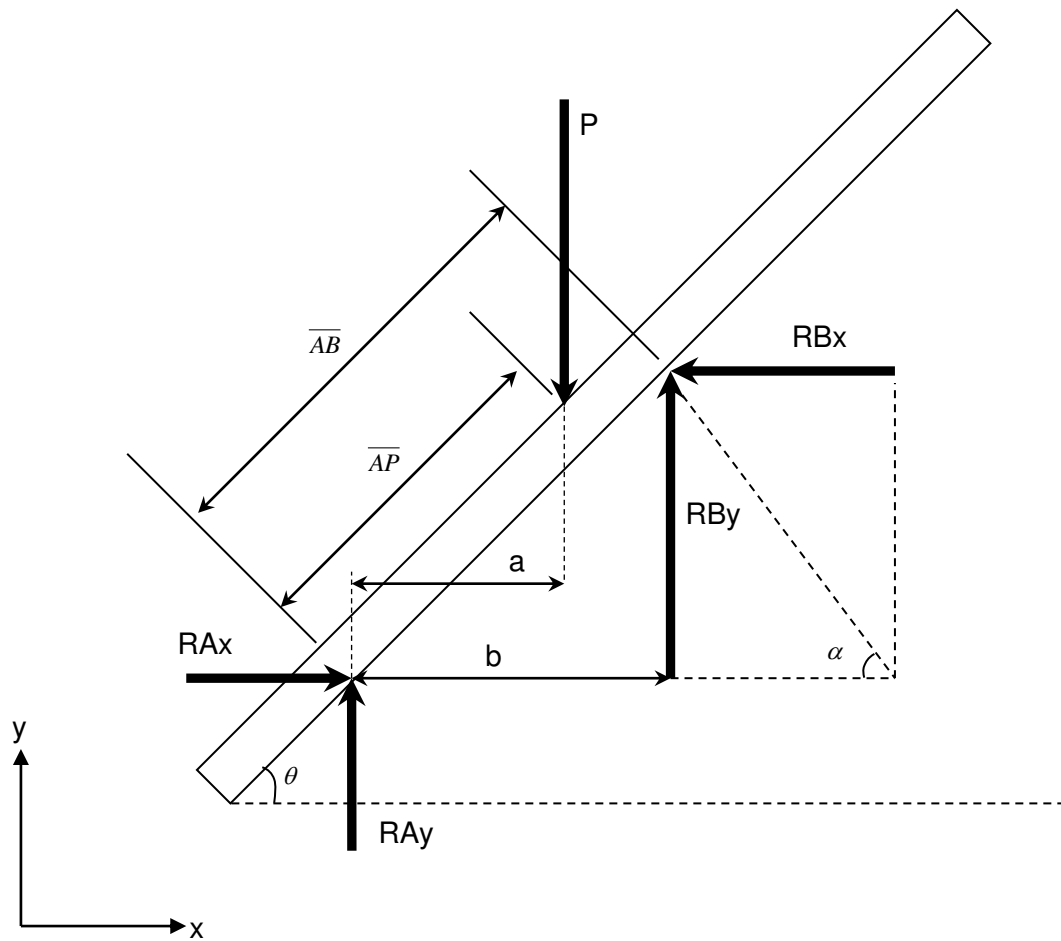


Figura 46. Diagrama de Cuerpo Libre de la cercha

Realizando las ecuaciones de equilibrio estático, obtenemos:

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow -aP + bR_B \text{sen}(\alpha) + cR_B \cos(\alpha) = 0 \quad [28]$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow R_{Ax} - R_{Bx} = 0 \Rightarrow R_{Ax} = R_{Bx} \Rightarrow R_{bx} = R_B \cos(\alpha) \quad [29]$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow R_{Ay} - P + R_{By} = 0 \Rightarrow R_{Ay} = P - R_B \text{sen}(\alpha) \quad [30]$$

$$a = \overline{AP} \cos(\theta)$$

$$b = \overline{AB} \cos(\theta)$$

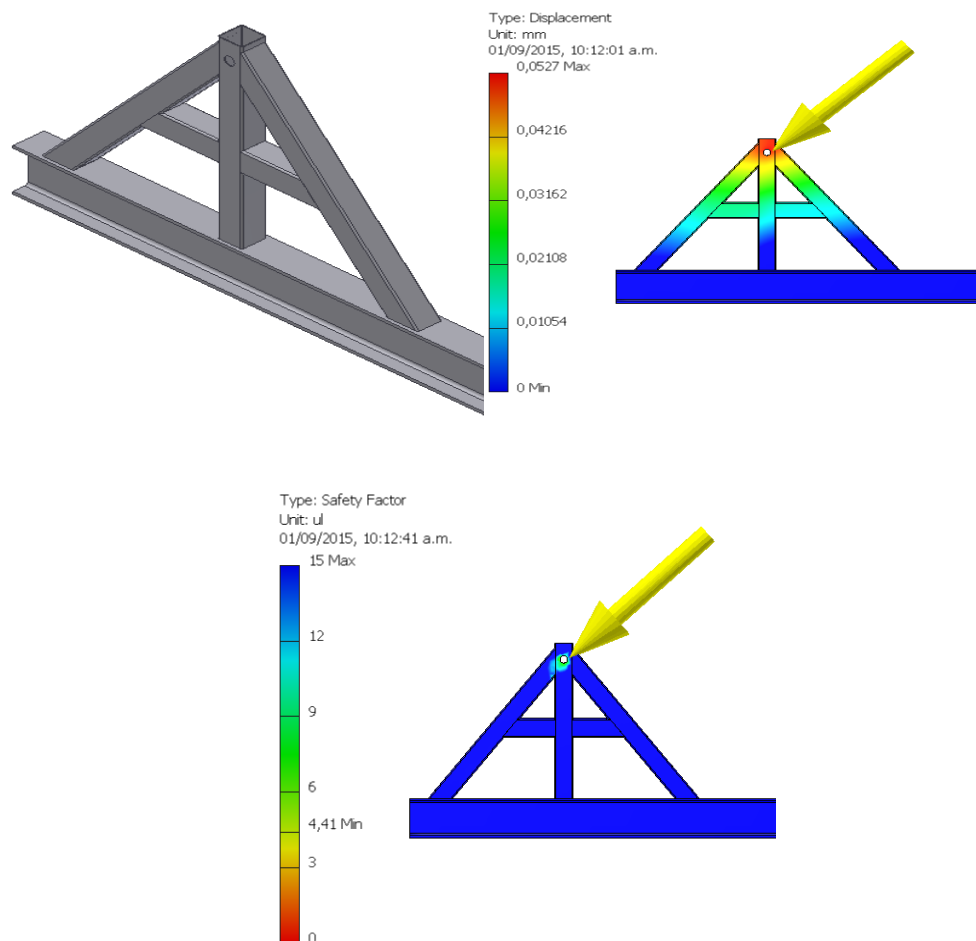
$$c = \overline{AB} \text{sen}(\theta)$$

Sustituyendo los valores a, b y c en la Ecuación 28, 29 y 30 obtenemos:

$$R_A = \sqrt{R_{Ax}^2 + R_{Ay}^2} \quad [31]$$

$$R_B = \frac{(\overline{AP}/\overline{AB})P \cos(\theta)}{\text{sen}(\alpha + \theta)} \quad [32]$$

Una vez, obtenidos las reacciones se procede a realizar el análisis de esfuerzos en Autodesk Inventor con las mismas dimensiones para del tubo estructural cuadrado utilizado en el diseño de la cercha, ya dimensionado el soporte principal donde está ubicado el pivote de la cercha como se logra observar en la Figura 47, procedemos con dicho análisis estructural.

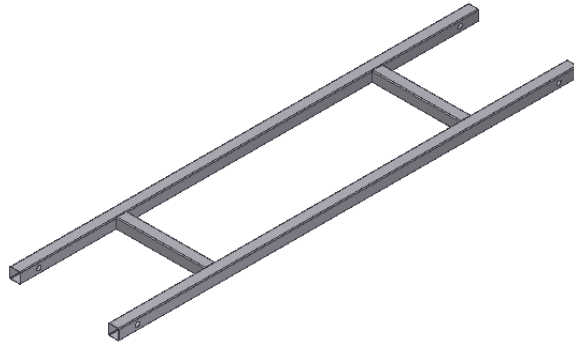


**Figura 47. Análisis de esfuerzos realizado al apoyo principal**

Luego de realizar este análisis estructural a este apoyo se puede observar un desplazamiento máximo de 0,064 milímetros y un factor de seguridad mínimo de 4,5 el cual proporciona la rigidez necesaria para soportar la estructura principal con todos los elementos que esta la conforma.

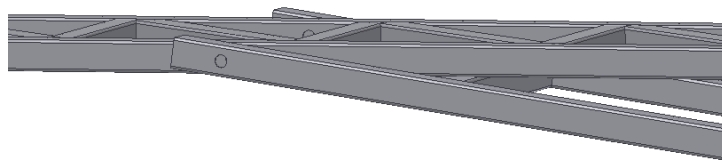
Una vez obtenido las dimensiones y los análisis de esfuerzos de la cercha y el apoyo A, procedemos a dimensionar en el Software Inventor el vástago el cual permitirá a la cercha tomar el ángulo deseado con respecto a la horizontal, como se calculó anteriormente la longitud del vástago será de 2,35 metros, igualmente se

dimensionara con un tubo estructural cuadrado de las mismas dimensiones que se utilizaron en la cercha.



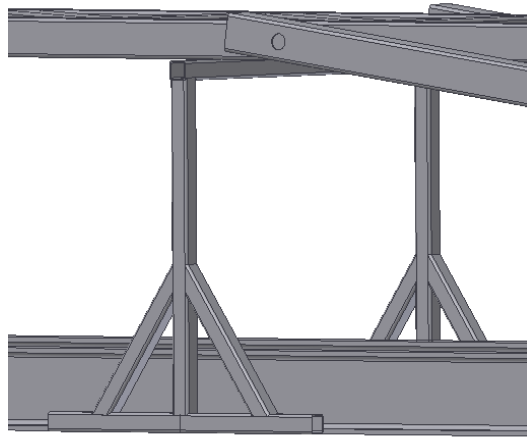
**Figura 48. Geometría asignada al vástago.**

Como se ilustra en la Figura 48, al igual que la cercha los vástagos poseen un elemento de unión entre ellos los cuales se denominan travesaños, estos están orientados principalmente a proporcionar rigidez a este elemento de manera de no ceder al peso proporcionado por la cercha y la tubería llena de fluido, de igual manera estos crean un apoyo en la cercha, que genera un descanso en la posición horizontal como se muestra en la Figura 49, lo que genera que en dicha posición el marco principal (Cercha) tenga otro punto de apoyo, disminuyendo la fuerza aplicada a los pernos de unión del punto B.



**Figura 49. Apoyo entre la cercha y el travesaño del vástago.**

A pesar de tener este apoyo entre la cercha y el vástago en la posición horizontal, se decide colocar un segundo apoyo en la cercha para dicha posición, ya que esta es la más desfavorable para el vástago, porque estaría soportando el peso completo de la tubería y el fluido. Dicho apoyo adicional se logra visualizar en la Figura 50



**Figura 50. Soporte secundario de la cercha**

#### 4.8.4. Riel

Una vez determinado cómo será el prototipo final de la base reclinable, se debe seleccionar el riel sobre el cual deberá ir unido mediante un patín, el vástago del soporte principal, previamente se recomienda que esta interfaz entre el patín y el riel este lubricado para facilitar el deslizamiento entre estos elementos, para esta sección se selecciona un viga estructural IPE 140 el cual se logra observar en la Figura 51, y sus propiedades en la Tabla 27, se utiliza esta viga por la facilidad de adquirir en el mercado y por ser el perfil con las dimensiones que mejor se ajusta a las limitaciones de espacio disponible en la estructura disponible. Este riel llevará unas perforaciones lineales a lo largo de la parte superior las cuales permitirá ajustar la inclinación de la sección de prueba.

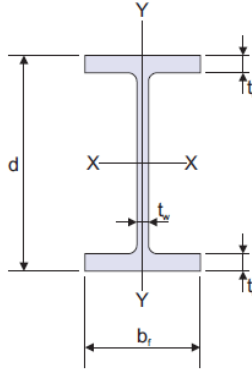


Figura 51. Perfil de viga IPE

Tabla 27. Propiedades mecánicas de la viga estructural de perfil IPE

Propiedades Mecánicas			
	Pto. de cedente	Esfuerzo máx.	Alargamiento %
ASTM –A36	$F_y \text{ Kg/cm}^2$ (min.)	$F \text{ min. Kg/cm}^2$	50 mm
	2500	4100/5600	20

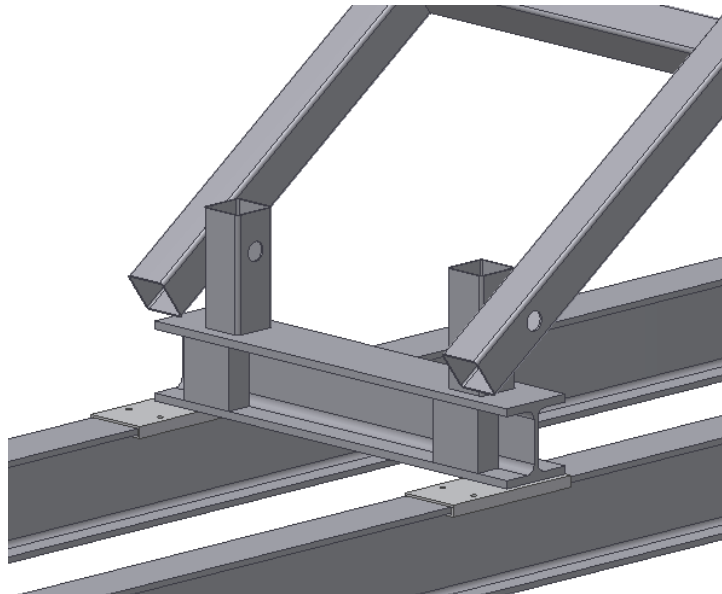
Como se puede observar en la siguiente figura #, se ubican las perforaciones en la viga obteniendo un total de 23 perforaciones las cuales representan la ubicación de la sección reclinable con una diferencia de 5 grados empezando de una posición horizontal (0 grados) hasta la posición vertical (90 grados).

#### 4.8.5. Patines

Esta pieza sirve de intermediario entre el vástago y el riel, permitiendo el ajuste de la estructura reclinable a lo largo de la viga estructural seleccionada anteriormente, el patín se ajustara al perfil de dicha viga y la construcción de dicha pieza se realizara mediante un proceso de corte y soldadura de una lámina de acero, para este proceso se recomienda consultar personal experto en el área de soldadura con respecto a cuál proceso utilizar para la construcción del patín de deslizamiento.

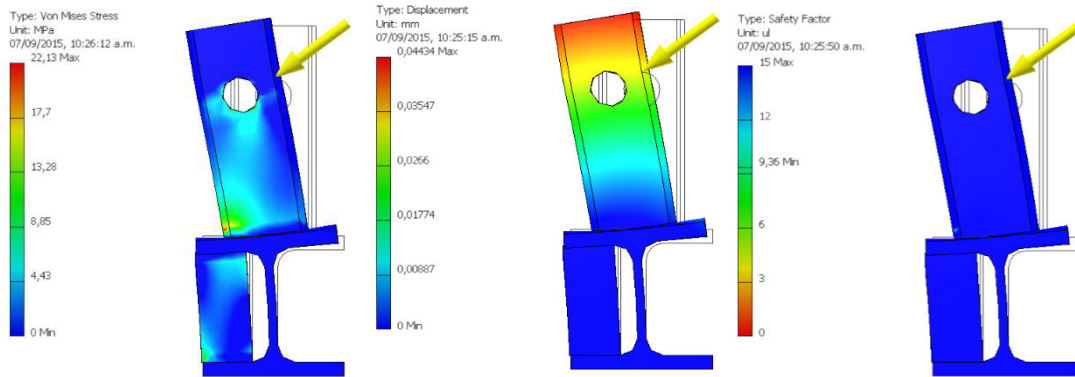


Para el diseño de dicho patín seguimos las recomendaciones realizadas por Tovar e Ibarra (2007), donde se utiliza un perfil estructural doble T, en este caso se utilizad una Viga de perfil HEA 100, y a este se le coloca un soporte para reforzar dicho elemento de las fuerzas aplicadas cuando la tubería este completamente llenas de fluido. Este elemento de reforzamiento se logra visualizar en la Figura 52. Dicha viga doble T debe unir los patines que deslizan sobren los dos rieles de manera de que estos realicen el movimiento lineal de manera sincronizada pudiendo encajar los pasadores sobre las perforaciones sin ningún problema.



**Figura 52. Soporte de la viga de unión de los rieles**

Posteriormente se procede a realizar un análisis de esfuerzo para verificar que los factores de construcción cumplan con las exigencias. En este caso podemos observar en la Figura 53 que el factor de seguridad mínimo que posee este elemento de sujeción de la estructura es de 9, igualmente se logra observar un desplazamiento máximo de apenas 0,04 milímetros. Haciendo el patín lo suficientemente seguro para soportar la estructura cuando esta esté en operación.



**Figura 53. Análisis de esfuerzos realizados al patín de deslizamiento**

#### 4.8.6. Mecanismo de elevación

Para esta sección se requiere un mecanismo automatizado para brindar confianza al operario de poder realizar esta acción de inclinación sin correr ningún riesgo físico, es por esto que se plantea utilizar un cabrestante el cual es un dispositivo impulsado por un motor eléctrico acoplado a un rodillo en cual posee una cuerda o cable, que sirve para levantar objetos o cargas pesadas. El mismo se puede visualizar en la Figura 54.



**Figura 54. Cabrestante eléctrico**

Dicho mecanismo estará sujeto a la base superior de la estructura y el cable estará sujeto a la cercha, y de esta manera poder realizar el levantamiento de la estructura al ángulo requerido. Para la selección de este cabrestante se debe calcular el peso total de la estructura contando todos los accesorios e instrumentos de medición y la tubería

llena completamente del fluido más denso a trabajar, al realizar esta medición, podemos observar que da como resultado una masa aproximada de 220 kilogramos, al obtener dicho valor se debe seleccionar un cabrestante con una carga máxima que pueda soportar un valor de carga mayor este, realizando una búsqueda de este tipo de aparatos se puede observar cabrestante con una carga máxima de hasta 400 kilogramos, los cuales son ideales ya que podrán elevar el doble del peso máximo calculado, obteniendo un factor de seguridad para los operarios de este circuito, cabe destacar que este equipo solo realizara la elevación de la estructura reclinable, ya que esta misma al momento de estar realizando las pruebas experimentales estará soportada por el vástago anclado a los rieles de esta estructura.

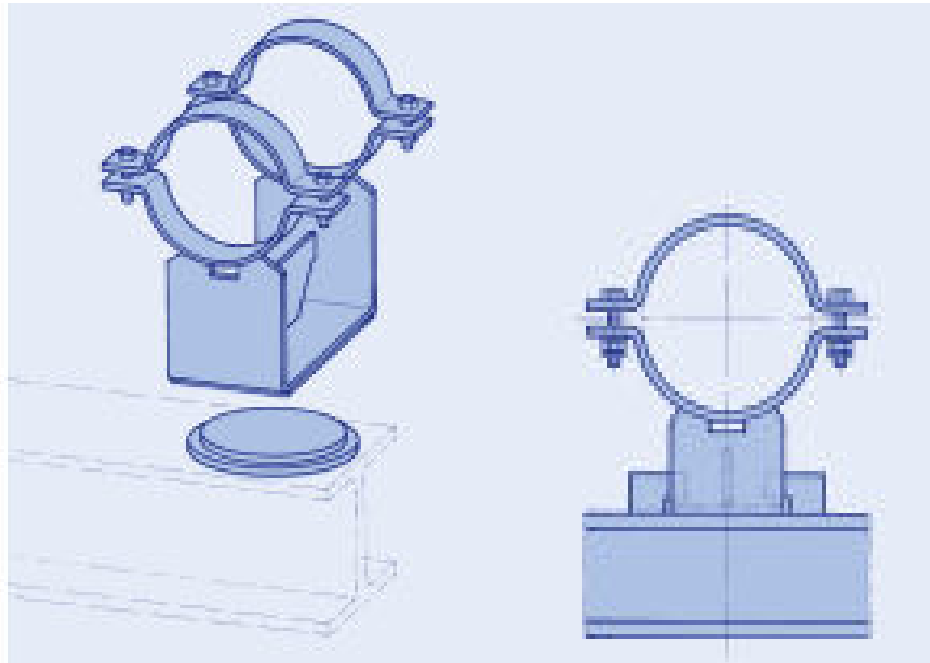
#### 4.8.7. Sujeción de la tubería

Este apartado se refiere a los soportes que se requieren para que la tubería de 2 pulgadas utilizada en el diseño de este circuito, esta sujeción se regirá por la Norma PDVSA HG-251 la cual nos indica que criterios debemos utilizar para el diseño de los soportes, en la Tabla 28, podemos observar el criterio de distancia máxima requerida para la ubicación entre los soportes.

**Tabla 28. Espacio entre soportes de tubería**  
Fuente: Norma PDVSA HG-251

<b>Espacio máximo entre los soportes de tubería</b>	
<b>Diámetro de tubería</b>	<b>Espacio de Soporte</b>
1" a 2"	4,5m
3"	7,6 m
4" a 12"	9,0m
Sobre 12"	*
* Considerando espacio aumentado	

Igualmente la norma PDVSA nos indica los tipos de materiales para utilizar en la construcción de dichos soportes de tubería, las cuales no deben usarse soportes de hierro colado, hierro dúctil o hierro maleable, y se deben usar planchas de mínimo 3/8 de pulgada para la construcción de dichos soportes. En la siguiente Figura 55 se logra observar el perfil seleccionado para los soportes de la tubería. Dicho soporte debe respetar las alturas de montaje las cuales se refieren a la distancia entre el extremo inferior de la tubería y la base que debe estar entre 50 mm y 100 mm.

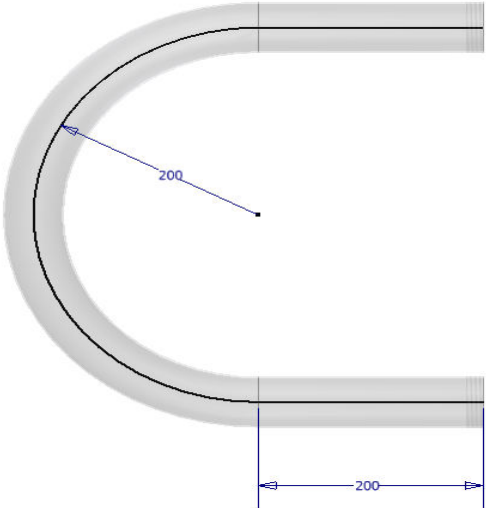


Fuente: catálogo LISEGA  
Figura 55. Soporte de tubería tipo 49

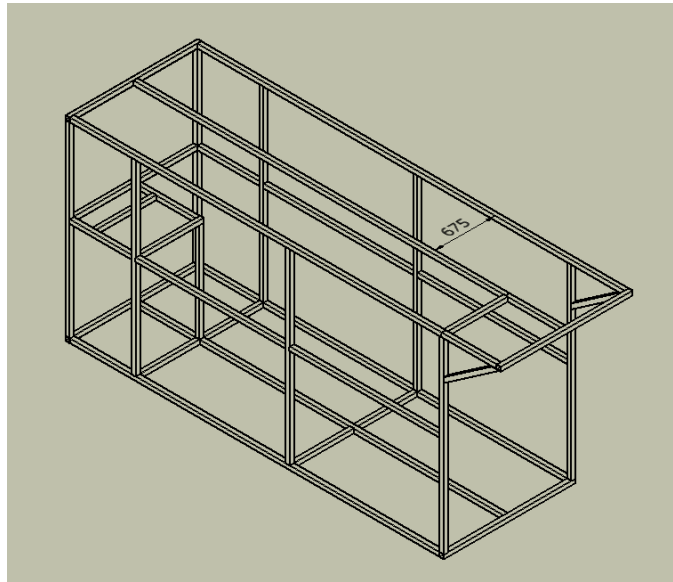
#### 4.9. Sección tipo “U”

Ya sabemos que se ha definido una longitud de desarrollo y de pruebas de un distancia de 3 metros en total, por otra parte la configuración de la tubería debe tener forma de “U” que estando en posición horizontal ambos tubos estén en el mismo plano paralelo al suelo, con la finalidad de realizar pruebas tanto de manera ascendentes como descendentes con las respectivas inclinaciones las cuales presentara el diseño de este banco de pruebas.

Es importante fijar el radio de curvatura que presentara esta sección tipo “U” de la tubería, en la Figura 56 se podrá observar como a la tubería se le define un radio de curvatura de 200 milímetros y un tramo recto de 200 milímetros el cual ira en unido al resto de la sección de prueba mediante uniones universales. Tomando en consideración las limitaciones de la estructura la cual podemos observar en la Figura 57, la cual muestra una distancia de 0.675 m de ancho entre las secciones del techo de la estructura, por la cual pasara la sección de prueba al momento de estar inclinada.



**Figura 56. Tubería en forma de U**



**Figura 57. Vista Isométrica de la estructura metálica.**

#### **4.10. Selección de instrumentos de medición y accesorios de la tubería.**

- Medición de caudal

La medición de caudal es importante para la realización del banco de ensayos, ya que, mediante la medición del caudal se pueden controlar los patrones de flujo que se pueden presentar al realizar las pruebas experimentales, igualmente como se ha mencionado anteriormente se busca la versatilidad de este circuito obteniendo un alto rango de operación, esto se refiere al manejo y medición de bajas y altas viscosidades dependiendo del tipo de fluido con el cual se desee operar. Como este diseño pretende manejar partículas sólidas se debe utilizar un medidor de caudal no intrusivo, con la finalidad de no generar desgaste y daño en tales instrumentos.

De tal manera se procede a realizar una selección de un medidor de caudal no intrusivo, el cual permitirá manejar los rangos de operación en las pruebas a realizar.

**Tabla 29. Características de medidores de caudal**  
**Fuente: Fernández, J. (2008)**

Comparación de las características de los medidores de caudal							
Elemento de Medición	Uso Recomendado	Radio de medición de flujo	Caída de presión	Exactitud	Diámetros aguas arriba requeridos	Efecto de la viscosidad	Costo
<b>Tubo venturi</b>	Líquidos limpios, sucios y viscosos; algunas lechadas	4 a 1	Bajo	$\pm 1$ de escala completa	5 a 20	Alto	Medio
<b>Boquilla de flujo</b>	líquidos limpios y sucios	4 a 1	Medio	$\pm 1$ a $\pm 2$ de escala completa	10 a 30	Alto	Medio
<b>Tubo pitot</b>	líquidos limpios	3 a 1	Muy bajo	$\pm 2$ a $\pm 5$ de escala completa	20 a 30	Bajo	Bajo
<b>Target meter</b>	Líquidos limpios, sucios y viscosos; algunas lechadas	10 a 1	Medio	$\pm 1$ a $\pm 5$ de escala completa	10 a 30	Medio	Medio
<b>Desplazamiento positivo</b>	líquidos limpios y viscosos	10 a 1	Alto	$\pm 0.5$ de la tasa	Ninguno	Alto	Medio
<b>Turbina</b>	Líquidos limpios y viscosos	20 a 1	Alto	$\pm 0.25$ de la tasa	5 a 10	Alto	Alto
<b>Vortex</b>	líquidos limpios y sucios	10 a 1	Medio	$\pm 1$ de la tasa	10 a 20	Medio	Alto
<b>Electromagnético</b>	líquidos limpios, sucios y conductivos; lechadas	40 a 1	Ninguna	$\pm 0.5$ de la tasa	5	Ninguna	Alto
<b>Ultrasónico (Doppler)</b>	líquidos sucios y viscosos y lechadas	10 a 1	Ninguna	$\pm 5$ de escala completa	5 a 30	Ninguna	Alto
<b>Masa (Coriolis)</b>	Líquidos limpios, sucios y viscosos; algunas lechadas	10 a 1	Baja	$\pm 0.4$ de la tasa	Ninguno	Ninguna	Alto
<b>Masa (Térmico)</b>	Líquidos limpios, sucios y viscosos; algunas lechadas	10 a 1	Baja	$\pm 1$ de escala completa	Ninguno	Ninguna	Alto

Luego de observar la Tabla 29 donde se puede visualizar los diferentes medidores de caudal y sus principales características, se decide colocar un medidor de tipo electromagnético, se elige este tipo de medidor de caudal ya que presenta ciertas ventajas al no poseer partes móviles su desgaste y mantenimiento es bastante bajo, igualmente, la pérdida de presión es muy baja al ser un dispositivo no intrusivo. También este tipo de instrumento de medición es de alta precisión y confiabilidad, su

principio de funcionamiento se basa en la ley de inducción electromagnética de Faraday, cuando los líquidos conductores se mueven a través de un campo magnético, el voltaje inducido es generado por el conductor, y cuando el fluido pasa a través de este campo magnético de forma perpendicular a la dirección del flujo, los conductores eléctricos generan voltaje en proporción a la velocidad media. Por lo tanto, el fluido que se está midiendo debe alcanzar la conductividad mínima y de esta manera midiendo la tensión inducida se puede obtener la velocidad del líquido, el caudal volumétrico se obtiene a partir de la sección transversal de la tubería. Otro factor que influye en la selección de este dispositivo es que al ser un banco de pruebas a pequeña escala este debe respetar una distancia de mínimo 5 veces el diámetro arriba del dispositivo para su correcta medición. A continuación se muestra en la figura# las especificaciones del medidor de flujo electromagnético.

**Tabla 30. Especificaciones del medidor de caudal electromagnético**

<b>Especificaciones</b>	
Marca	EUROMAG
Modelo	MUT2200EL
Tamaño	50 mm (2")
Material de la tubería pasaje	AISI 304 (Inox)
Temperatura de operación	-40°C - 80°C
Presión de operación	16 bar
Velocidad	0,05 m/s - 10 m/s
Caudal	0,35 m <sup>3</sup> /h - 70,69 m <sup>3</sup> /h
Error	0,2%





**Figura 58. Medidor de caudal electromagnético**

- Medición de temperatura

La medición de temperatura se utiliza para monitorear y controlar los rangos establecidos, ya que, algunos instrumentos poseen rangos de operación los cuales estos se pueden ver afectados en su medición si sobrepasan las temperaturas en las cuales trabaja el instrumento. De igual manera el rango de operación de este banco de pruebas estará alrededor de la temperatura ambiente, como este diseño se está realizando sobre un banco de ensayos en las instalaciones de INTEVEP, se utilizará el mismo medidor de temperatura, este medidor es una termocupla y al flujo poseer sólidos en suspensión este instrumento debe poseer un encamisado de protección como se muestra en la Figura 59, el cual tiene como finalidad de proteger la termocupla de los sólidos presentes en el fluido. A continuación se muestra en la Tabla 31 las especificaciones del instrumento y en la Tabla 32 las especificaciones del encamisado.

**Figura 59. Encamisado de termocupla**



**Tabla 31. Especificaciones del medidor de Temperatura**

<b>Especificaciones</b>	
Marca	SMAR
Modelo	J
Tipo	NBS Monograph 125
Rango de operación	-150°C hasta 750°C
Precisión digital °C	± 0,4

**Tabla 32. Especificaciones del encamisado de la termocupla**

<b>Especificaciones</b>	
Tipo	Metálico
Material	Monel. 400
Composición	67% Ni – 30%Cu
Observaciones	Combina alta dureza y flexibilidad y resistente a muchos corrosivos.

- Medición de presión

Al igual que el caudalímetro, el medidor de presión (PT) juega un papel importante en la correcta operación de un circuito experimental, ya que sabemos que los equipos al igual que los instrumentos poseen un rango de operación lo cual permite que sean lo suficientemente seguros para los operadores, de tal manera que este dispositivo nos permite controlar dichos rangos. Otro punto importante de la utilización de estos medidores es conocer el gradiente de presión que se presenta a lo largo del circuito debido al flujo líquido-sólido presente en la tubería y al ubicar estos medidores se debe tomar en consideración que sean lo menos intrusivo posible de manera de no perturbar el comportamiento del fluido (Patrón de flujo), ya que se encuentran cerca de las zonas de visualización. Para este tipo de medición se requiere un medidor de presión mecánico de diafragma, se decide utilizar este tipo de equipo por su facilidad de conseguir en el mercado y por su relativo bajo costo comparado con otros medidores, igualmente una parte importante en la selección de este medidor de presión es la utilización con partículas sólidas en suspensión. A continuación en la Tabla 33 se puede observar las especificaciones de este instrumento.

**Tabla 33. Especificaciones del medidor de presión**

<b>Especificaciones</b>	
Marca	SMAR
Modelo	LD400D
Precisión	$\pm 0,045 \%$
Presión máxima	300 psi
Temperatura de operación	-40°C hasta 85°C
Rangeability	200:1

- Medición de Nivel

El medidor de nivel estará ubicado en el tanque de almacenamiento, este permitirá medir la columna de líquido en el tanque. De igual manera mediante este sensor se puede calcular el caudal de líquido, este se calcula tomando en cuenta el área, el tiempo y la columna de líquido presente en el tanque de tal manera que podemos comparar y controlar este factor con el caudalímetro seleccionado. Cabe acotar que dichos tanques también poseen un medidor de nivel visual el cual consiste en una tubería de plástico el cual se logra visualizar la altura del nivel del líquido.

Como se ha mencionado anteriormente estos tanques fueron reutilizados de un banco de pruebas ya existente, dichos tanques poseen un sensor de nivel el cual debe ser cambiado ya que el flujo que se va a estudiar contiene partículas sólidas debido a la mezcla que se realiza en dicho tanque. Es por esto, que se decide utilizar un sensor de nivel de diafragma marca SMAR modelo SR301T ya que dichos sensores tienen la capacidad de trabajar con sólidos en suspensión. A continuación en la Tabla 34 se observará las especificaciones de dicho instrumento.

**Tabla 34. Especificaciones del sensor de nivel**

<b>Especificaciones</b>	
Marca	SMAR
Modelo	SR301T
Rango de Temperatura	10 °C a 100°C
Presión máxima	2500 psi
Fluidos de trabajo	Aceite mineral, agua, entre otros
Tamaño	2"

- Válvulas y codos

Esta sección está determinada a ubicar y enumerar los accesorios utilizados en las líneas del circuito como se puede visualizar en la Tabla 35, se observa la cantidad de válvulas de desvió, válvulas de paso y válvulas check utilizadas en el circuito experimental. De la misma manera presentamos la cantidad de codos de radio largo utilizados para el diseño de dicho circuito.

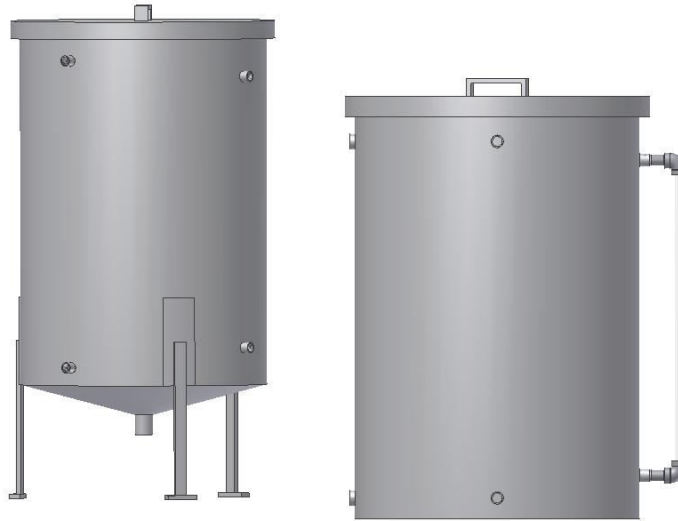
**Tabla 35. Cantidad de accesorios en el circuito**

<b>Cantidad</b>	<b>Accesorios</b>
4	Válvulas de bola de 1"
4	Válvulas de bola de 2"
1	Válvula check de 2"
1	Codo reductor 1 ½"
6	Codos de radio largo de 1"
3	Codos de radio largo de 2"
4	Conexiones Tee de 2"
6	Conexiones universales 2"

#### **4.11. Tanques de almacenamiento**

Para los tanques de almacenamiento se toma la decisión por recomendaciones de la Gerencia de Infraestructura y Mejoramiento, y por la necesidad de disminuir los costos en la construcción de este circuito, la de modificar uno de los dos tanques de almacenamientos de líquidos ya existentes en el laboratorio de Noreste 4. Las modificaciones realizadas en dicho tanque es la de realizar un fondo cónico, como se podrá observar en la siguiente Figura 60, ya que esto permite una mejor limpieza del líquido ya que en el proceso de separación se pueden traspasar partículas sólidas a estos tanques de almacenamiento proveniente de la sección de separación, y eventualmente acumularse una cantidad suficiente de sólido el cual puede ocasionar daños en el sistema de bombeo de líquido.

Estos tanques tendrán un volumen total 197,5 litros el de fondo cónico y 192 litros el de fondo plano, siendo esto suficiente líquido para realizar los experimentos necesarios en este banco de ensayos.



**Figura 60. Tanques de almacenamiento de líquido.**

Una vez realizada la propuesta de modificar uno de los dos tanques del circuito PIV, procedemos a calcular las patas de soporte de este tanque, el cual permitirá la elevación del mismo, y así por medio de la gravedad poder pasar el fluido del tanque con más altura al tanque de descarga de la bomba. Citando la norma PDVSA 10603.2.201 nos indica en la Tabla 36 las dimensiones y los numero de patas del tanque.

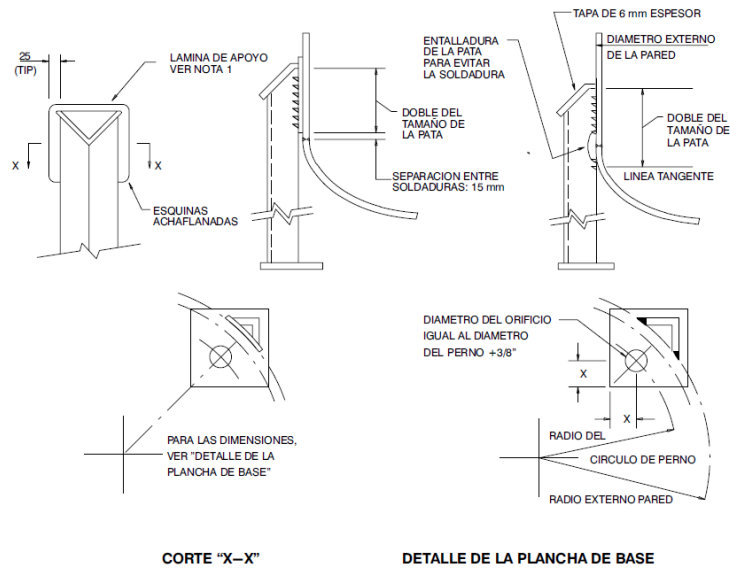
**Tabla 36. Tabla de dimensiones de la pata de soporte de un tanque vertical**  
**Fuente: Norma PDVSA 10603.2.3201**

<b>Diámetro externo de la pared</b>	<b>Número de patas</b>	<b>Tamaño de la pata</b>	<b>Lámina de la base</b>	<b>Diámetro del perno</b>
Hasta 600	3	80x80x10	125x125x12	¾”
601 a 1200	4	80x80x12	125x125x12	¾”
1201 a 1650	4	100x100x12	150x150x12	1”
1651 a 2400	4	150x150x12	200x200x12	1”
2400	De acuerdo al diseño			

Ya obtenido las dimensiones de la pata de soporte en la figura # se logra observar la ubicación de las patas y como van ubicadas en el tanque.

Nota:

1. El espesor de la lámina de apoyo será el menor valor entre los espesores de la pared o la pata
2. El material de la lámina de apoyo será el mismo de la pared. El resto de los elementos serán acero al carbono.
3. Las dimensiones serán las indicadas al menos que se indiquen algo diferente en los planos del recipiente.
4. Las soldaduras serán del tipo continuo de filete.
5. Las dimensiones están en milímetros al menos que se indiquen lo contrario.



**Figura 61. Detalles de ubicación del soporte del tanque**  
**Fuente: Norma PDVSA 10603.2.201**

#### 4.12. Selección de tuberías

La tubería seleccionada para este circuito es de tipo galvanizado, ya que por estar fabricado bajo la norma ASTM A 53, estos tubos son aptos para operaciones de formación en frío como doblado, rebordeado entre otras operaciones, igualmente estos tubos están fabricados para la conducción de gases y líquidos, lo cual es de gran utilidad ya que el circuito presenta una sección tipo “U”, las ventajas que este tipo de tubería presenta es que son altamente resistentes al impacto, por ende es necesario ya que se trabajara con partículas sólidas, también poseen una vida útil prolongada y no presentan notables variaciones en sus propiedades mecánicas por cambios de temperatura. En las Tabla 37 y Tabla 38 se pueden observar las propiedades mecánicas y químicas de dichos tubos.



**Tabla 37. Propiedades mecánicas**

Fuente: Catálogo de Unicon

Norma de fabricación	Grado del acero	Límite de fluencia		Resistencia a la tracción			
		Mínimo		Mínimo		Máximo	
		Mpa	psi	Mpa	psi	Mpa	psi
ASTM A 53 Tipo E (ERW)	A	205	30.000	330	48.000	-	-
	B	240	35.000	415	60.000	-	-

**Tabla 38. Propiedades químicas**

Fuente: Catálogo de Unicon

Norma de fabricación	Grado del acero	Porcentaje máximo de elementos			
		C (Carbono)	Mn (Manganeso)	P (Fósforo)	S (Azufre)
ASTM A 53 Tipo E (ERW)	A	0.25	0.95	0.05	0.045
	B	0.30	1.20	0.05	0.045

#### 4.13. Recolección de sólidos

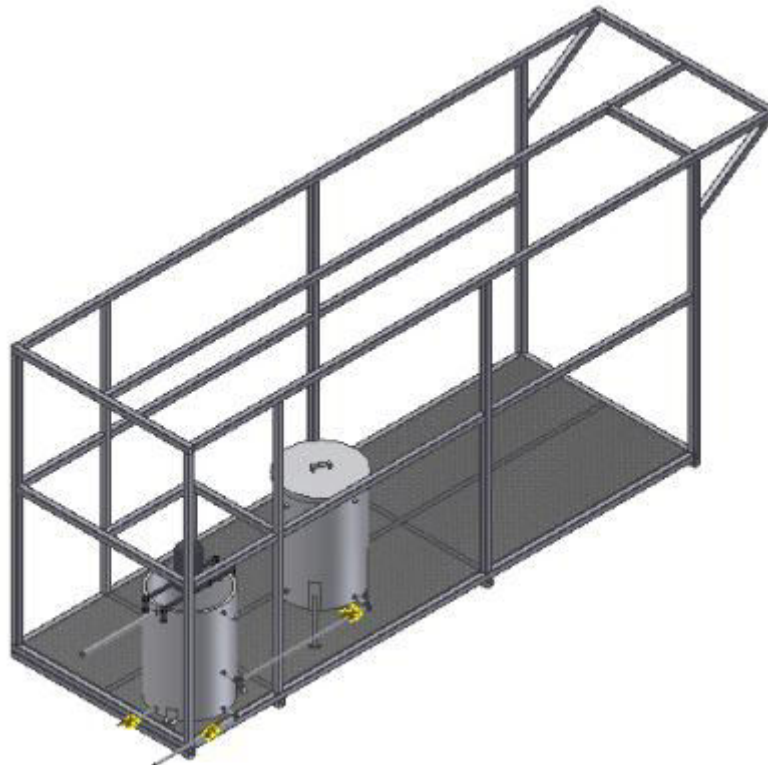
Para la recolección de sólidos se decide seleccionar la opción más fácil la cual es colocar un recipiente cilíndrico, el cual estará ubicado a la descarga de sólidos del hidrociclón, este permitirá recoger las partículas sólidas acompañadas de una porción de líquido, para luego pasar por un proceso de limpieza, lo que permitirá reutilizar dichas partículas en el sistema.

#### 4.14. Adecuación del banco de ensayos

Como el espacio es reducido en este diseño conceptual, debemos ubicar de forma precisa y estratégica cada elemento que este lo conforma, debido a esto se plantearan las siguientes ubicaciones de los dispositivos, equipos y elementos, de manera de tener el espacio suficiente para el buen comportamiento de este banco de ensayos. A continuación se mostrara la reubicación y colocación de los elementos que conforman este diseño conceptual.

##### 4.14.1. Reubicación de los tanques de almacenamiento.

Luego de haber rediseñado los tanques de almacenamiento, mostrados en la Figura 60 procedemos a reubicarlos en la estructura de la siguiente manera.

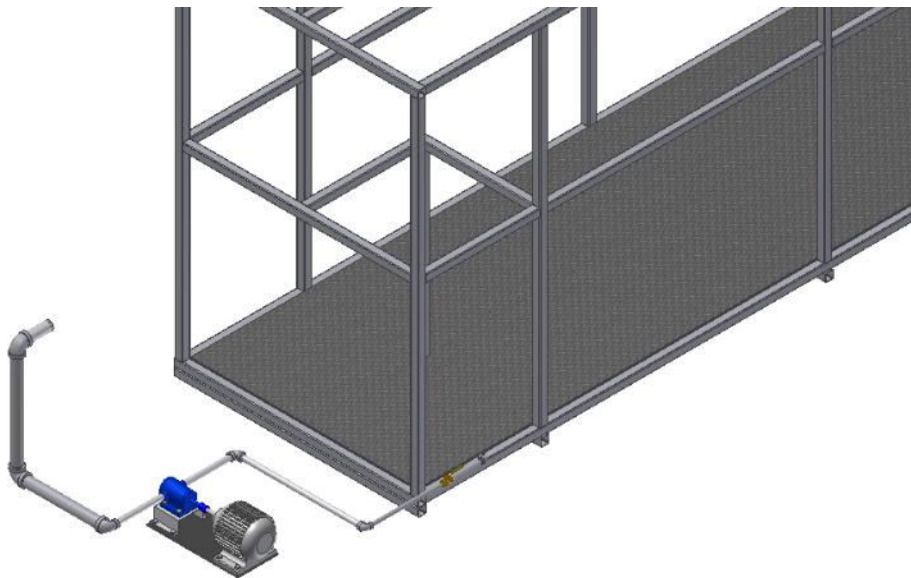


**Figura 62. Ubicación de los tanques de almacenamiento**

Como podrán observar en la Figura 62, los tanques de almacenamiento de líquido se ubicaron ambos en la parte inferior, ya que se deja espacio en la parte superior para la ubicación del dispositivo de separación. También podrán observar que la descarga de los tanques se reubicaron hacia la parte externa de la estructura debido a los soportes de la base de la sección de prueba, las cuales ocupan todo el espacio en la otra parte de la estructura.

#### 4.14.2. Reubicación de la bomba.

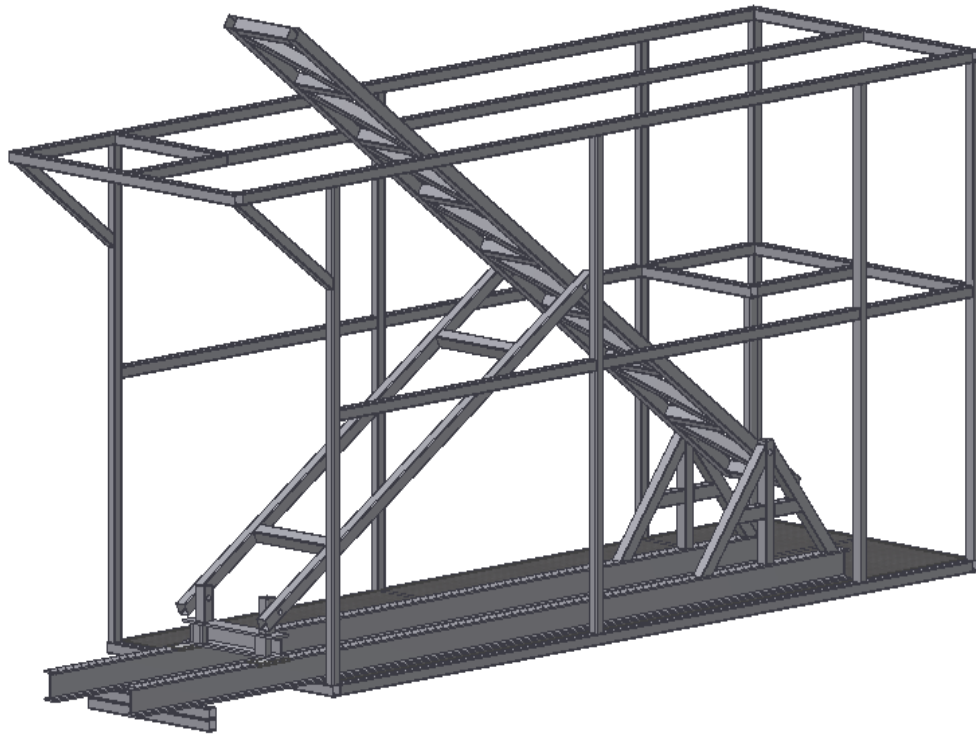
La ubicación de la bomba se plantea modificarla, ya que donde se encuentra en el circuito del PIV, esta genera vibraciones producidas por el motor eléctrico que la impulsa pudiendo afectar las mediciones que se requieran tomar, como se logra ilustrar en la Figura 63, la bomba marca con el motor eléctrico marca se reubica fuera de la estructura metálica y esta se ancla al suelo mediante pernos para reducir esas vibraciones que pudieran afectar las mediciones a realizar.



**Figura 63. Ubicación de la bomba**

#### 4.14.3. Ubicación del soporte de la sección de pruebas.

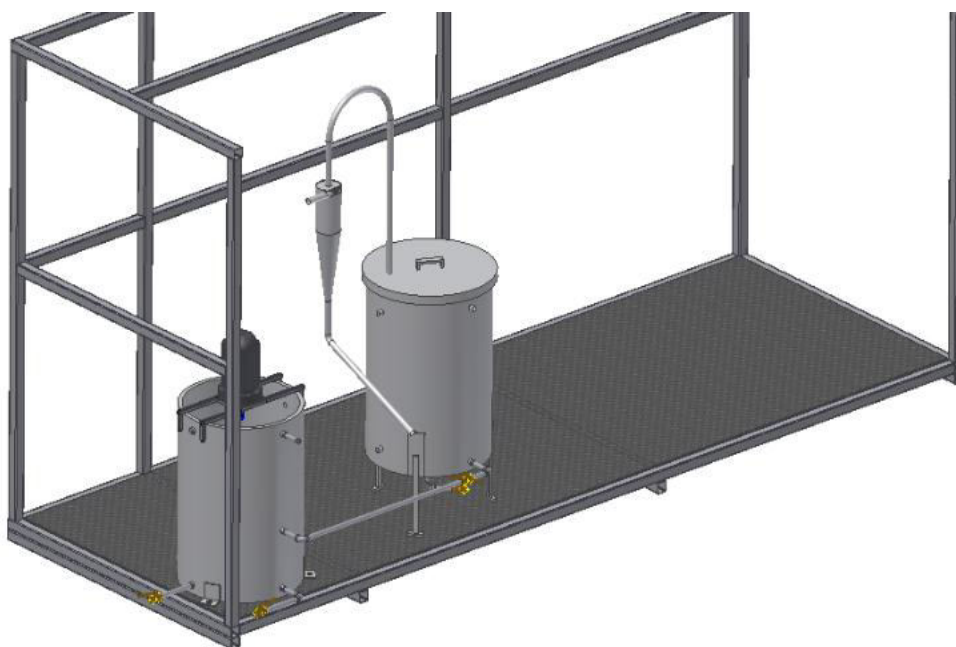
Es sabido, que el diseño de este circuito escala banco tendrá una sección reclinable entre 0 y 90 grados, por esta razón esta estructura se ubicara en un sector de la estructura donde se permite la inclinación de la sección de pruebas y esta no entorpezca el movimiento de la misma como se podrá visualizar en la Figura 64, la cual el techo de la estructura permite la inclinación completa de dicha sección.



**Figura 64. Ubicación de la estructura con inclinación variable**

#### 4.14.4. Ubicación de la sección de separación

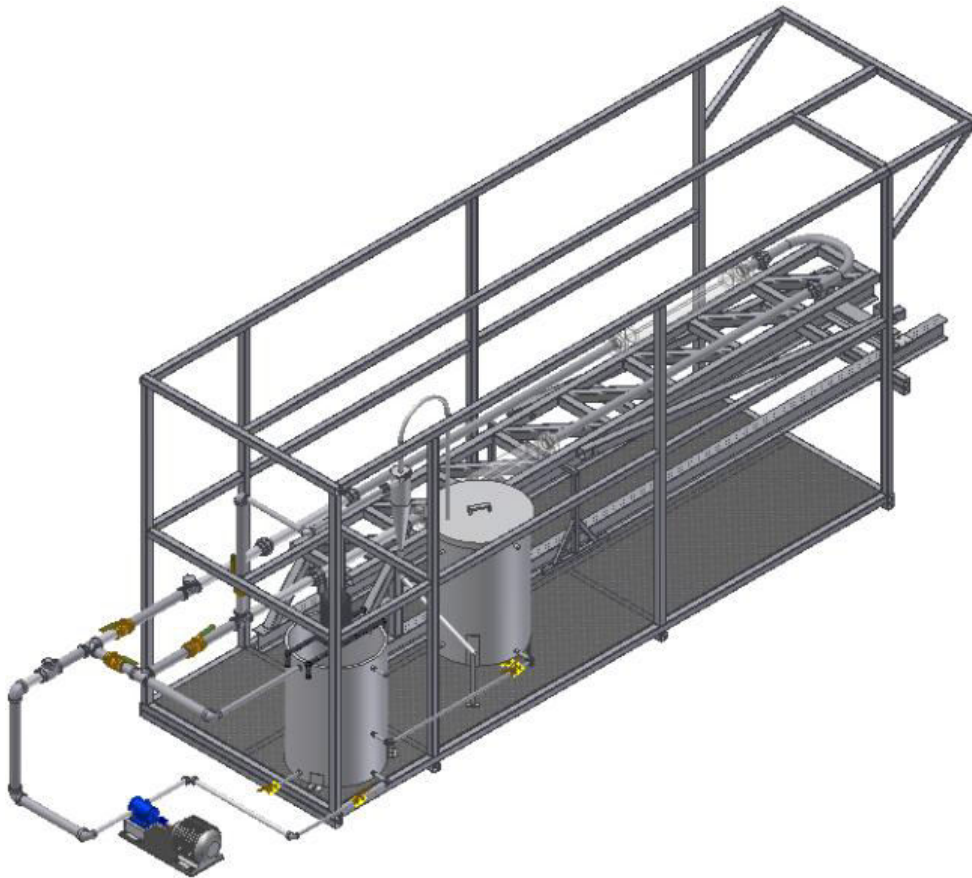
Para la sección de separación, se propuso utilizar un equipo de separación ciclónico, el cual debe estar ubicado por encima de los tanques de descarga de la bomba, lo cual permitirá el completo drenaje del ciclón cuando este no esté en funcionamiento. En la Figura 65 podrán observar la ubicación donde se instalara el hidrociclón.



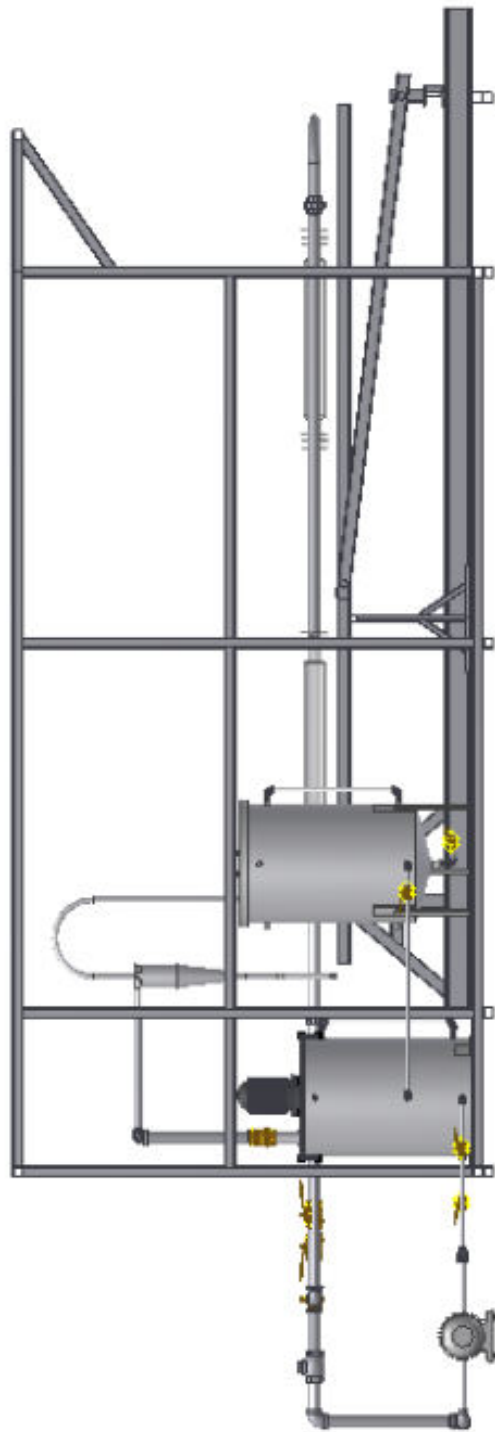
**Figura 65. Ubicación del hidrociclón**

#### 4.14.5. Vistas del circuito líquido-sólido

Una vez haber contemplado todos los criterios para el diseño y ubicación de los elementos que conforman este diseño de banco de ensayos líquido-sólido, obtenemos como resultado la propuesta final, la cual se ilustra en las siguientes figuras, donde se puede visualizar las diferentes vistas del circuito.



**Figura 66. Vista isométrica del banco de ensayos**



**Figura 67. Vista frontal del banco de ensayos**

#### **4.15. Diagramas**

El diseño de este circuito experimental escala banco tiene como propósito el hacer circular por flujo bifásico líquido-sólido, con la finalidad de realizar las mediciones necesarias para la predicción de comportamiento de las partículas sólidas en los sistemas de tuberías, el banco de pruebas consta con una sección de prueba tipo “U” movable con respecto a la horizontal entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . A continuación se presentaran los diagramas de bloque de procesos (DBP) en la Figura 68, diagramas de flujo de proceso (DFP) en la Figura 69 y los diagramas de tubería e instrumentación (DTI) en la Figura 70, pertinentes al circuito.



4.15.1. Diagrama de Bloque de Procesos (DBP)

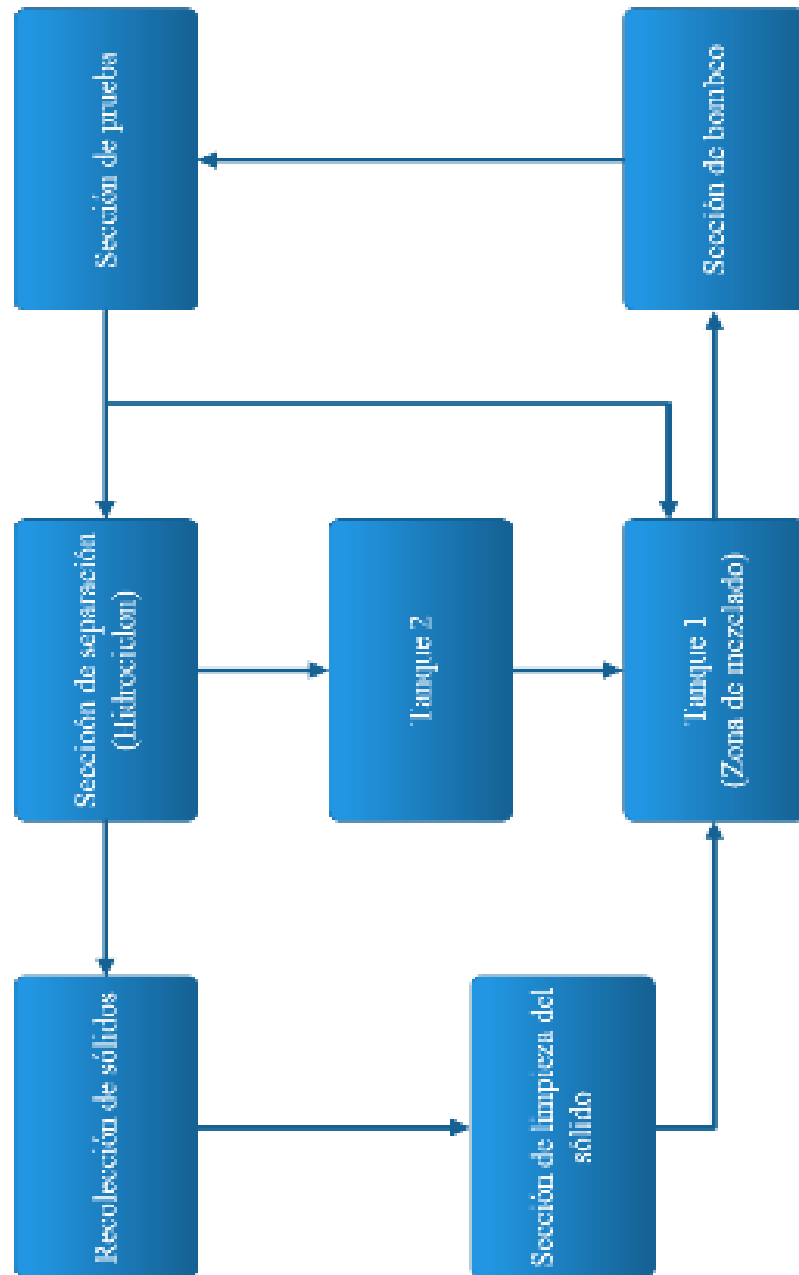


Figura 68. Diagrama de Bloque del circuito multifásico.

#### 4.15.2. Diagrama de Flujo de Proceso (DFP)

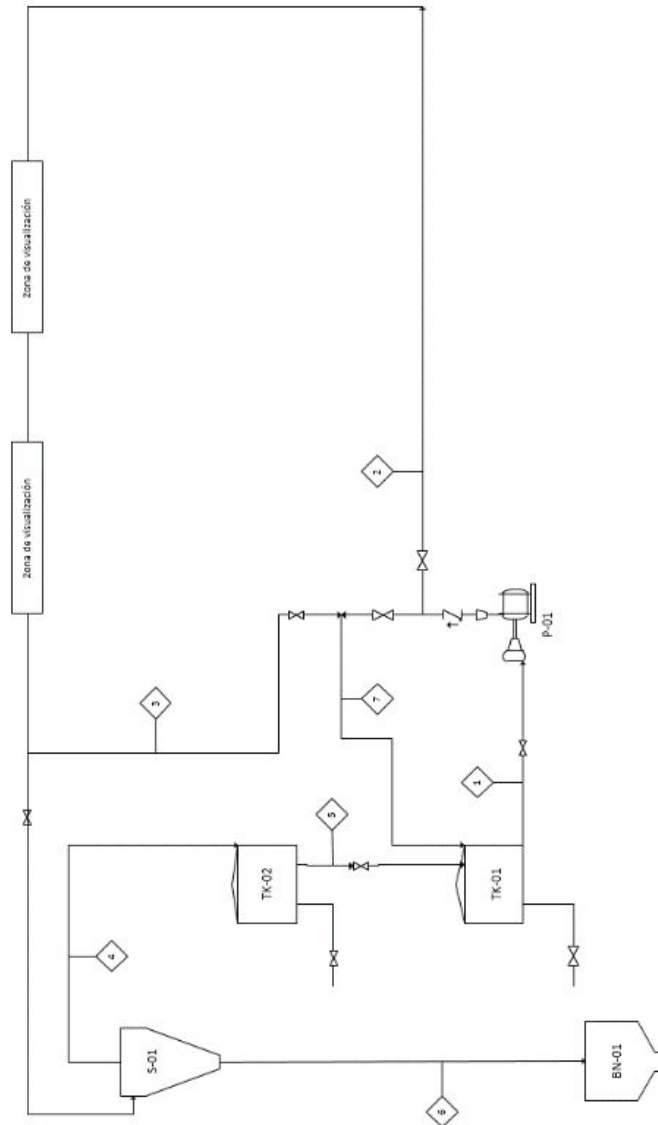
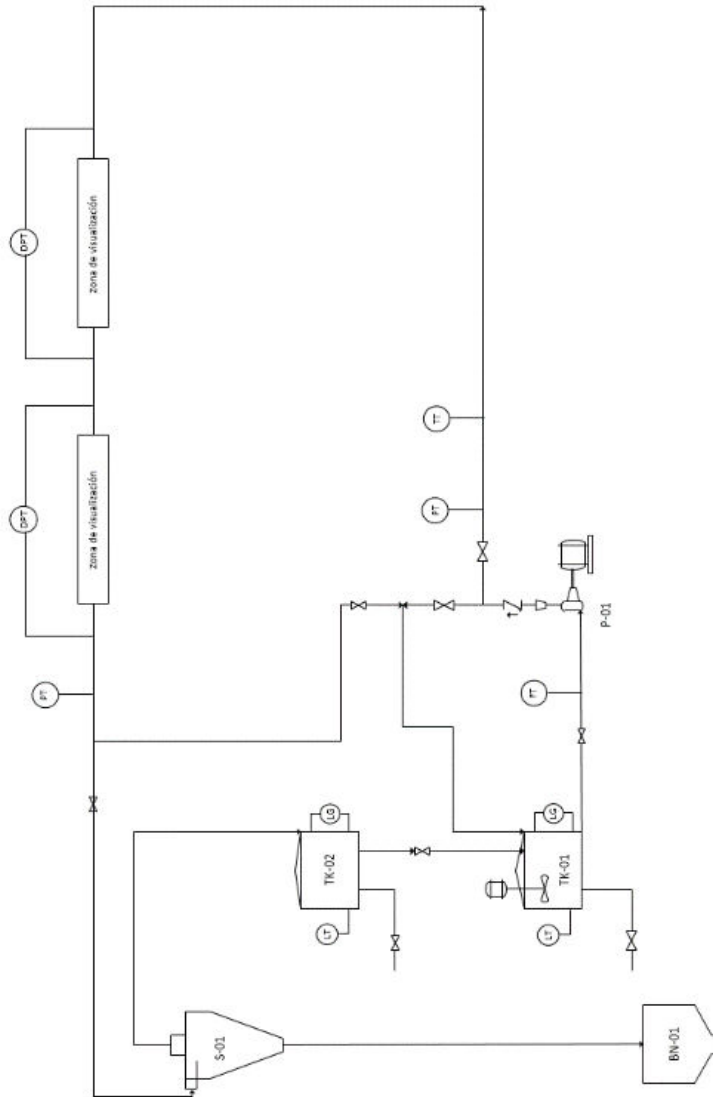


Figura 69. Diagrama de Flujo de Procesos.

### 4.15.3. Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI)



**Figura 70. Diagrama de Tuberías e Instrumentación.**

## 4.16. Operación del circuito

### 4.16.1. Procedimiento de elevación del circuito

En esta sección se dará a conocer el manejo de la sección de prueba del circuito, el cual cuenta con una sección de inclinación entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  con respecto a la horizontal, este movimiento es accionado mediante un cabrestante la cual convierte el movimiento angular de la cercha en un movimiento lineal del carro acoplado a los patines de la sección de prueba. Para realizar esta operación es necesario tener 3 personas las cuales una de ellas este manejando el motor eléctrico y las otras dos personas verificando que al momento de que el carro que realiza el movimiento llegue a la posición deseada estos coloquen los pernos de anclaje de la estructura. A continuación los pasos a seguir para realizar dicha operación:

1. El primer paso que se debe realizar es verificar que las tuberías estén completamente vacías y que el sistema de bombeo este apagado.
2. Verificar que las conexiones de los equipos de instrumentación estén en una posición que no entorpezca con la cercha al elevarla, de manera que no ocurra ningún tipo de daño con el cableado de los equipos.
3. Verificar que los patines no se encuentren apernados a los rieles.
4. Ya verificando los pasos 1, 2 y 3, el operario del motor eléctrico (Cabestrante) procede a encenderlo, este realiza el movimiento lineal del carro que mueve la estructura, una vez ubicado el carro en la posición deseada las 2 personas restantes proceden a ubicar los pernos de anclaje en su posición.

Para realizar el proceso de regresar la sección de prueba a una posición horizontal se deben seguir los mismos pasos, con la diferencia de colocar el motor eléctrico en función de reversa para que haga que dicha sección retorne a una inclinación menor o la posición inicial de  $0^\circ$  con respecto a la horizontal.

## **CAPITULO V**

### **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **CONCLUSIONES**

El objetivo general de este trabajo se cumplió en su totalidad, ya que se diseñó conceptualmente un banco de ensayos para el estudio de flujo líquido-sólido.

Se realizó una búsqueda bibliográfica en diferentes bases de datos, con la finalidad de realizar una comparación de parámetros de diseño y especificaciones de cada circuito con el diseño de este banco de ensayos. De esta manera, se obtuvo los criterios de diseño requeridos para la realización de este diseño conceptual del banco de pruebas. Igualmente, se puede observar una diferencia de criterio en algunos parámetros del diseño de un circuito, como lo es la longitud de desarrollo para flujo bifásico.

Se puede decir que el espacio disponible para la realización de este proyecto fue uno de los parámetros más importantes a tomar en consideración, ya que muchas decisiones importantes como la longitud de desarrollo, la ubicación de los equipos e instrumentos de medición, tanques de almacenamiento y tendido de tuberías fueron parámetros que se vieron afectados por esta limitación.

Considerando el espacio en la realización de este diseño no es una limitante para este banco de pruebas, ya que mostrando la versatilidad del mismo a este, a futuro se le puede agregar una línea de gas, así como realizar un cambio de diámetro de tubería a una pulgada, modificando el rango de estudios ya que se podrían hacer experimentos tanto bifásicos como trifásicos.

La estructura cuenta con una geometría lo suficientemente robusta que soporta la colocación de tuberías de 50,8 mm de diámetro o menor a este. De la misma manera esta estructura de inclinación variable está diseñada para operar entre 0° y 90°, pero posee una limitación de altura, el cual es el techo del laboratorio de noreste 4 haciéndolo útil solo hasta una inclinación máxima de aproximadamente 35°.

El banco de pruebas diseñado podría aportar un avance importante en adquisición de tecnología a la empresa, ya que con la construcción de este se obtendría un equipo totalmente original e innovador; el cual evitaría la contratación de empresas ajenas a la institución. No solo ofrecería el estudio de flujos bifásico líquido-sólido, sino también desarrollaría el potencial de los investigadores dentro de la corporación.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda la reubicación de toda la estructura, ya que donde se encuentra en estos momentos no permite que la sección de pruebas se incline hasta los 90° con respecto a la horizontal.

Al ubicar la bomba de manejo de sólidos fuera de la estructura metálica se recomienda la utilización de una manguera flexible en la descarga de la misma, de manera de minimizar las vibraciones que este equipo genera.

Se recomienda manejar el banco de ensayos con dos operarios de manera de evitar cualquier accidente en la inclinación de la sección de prueba.

Realizar un detallado proceso de calibración, ya que, se poseen equipos de alto costo y sensibles, como el medidor de caudal electromagnético.

Permanecer fuera de la estructura metálica mientras se estén realizando las pruebas en este banco de ensayos.

Estudiar la posibilidad de agregar una línea de gas al banco de ensayos.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Abdel, H., Aggour, M y Fahim, M. (2003). *Petroleum and Gas Field Processing*. USA: Marcel Dekker, Inc. 357 p
2. Aguilar, H. (2008) Efectos de la variación de la longitud del cono en la operación de un separador tipo ciclón. Tesis de magíster. Instituto Politécnico Nacional. D.F., México.
3. Anónimo(2010) Revisión del Estado del Arte para Realizar una Propuesta de Adecuación del Circuito Experimental Multifásicos Norte 6. PDVSA- Intevep
4. Aranguren, M. (2010). Diseño conceptual de un banco de pruebas para medición de campo de velocidades en flujo confinado. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”. Caracas.
5. Arias. F. (2006). *El proyecto de Investigación*. 5 ed. Caracas: Episteme C.A. 146 p.
6. Avallone, E., Baumeister, T. 1995. *Marks, Manual del ingeniero mecánico*. Tomos I y II. Editorial Mc Graw Hill; novena edición, México.
7. Balestrini, M. (2002). *Como de Elabora el Proyecto de Investigación*, 2ª ed. Caracas: BL Consultores Asociados.
8. Barberii, E.E. (1998) *El pozo ilustrado*, 3ra ed. Caracas: PDVSA. 372 p.
9. Beattie, D., Whalley, P., 1982. A simple two-phase frictional pressure drop calculation method. *International Journal of Multiphase flow* vol. 8, 83-87.
10. Brennen, C. (2008). *Fundamentals of Multiphase flow*. California, Cambridge University Press 410 p.
11. Cáliz, L., Márquez, J. y Álvarez, M. (2007) Evaluación de factibilidad para utilizar un separador ciclónico líquido-sólido a escala laboratorio. Nota técnica.
12. Crane. (1987). *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. McGraw-Hill
13. Daily, J., Halerman, D., 1975. *Dinámica de fluidos con aplicaciones en ingeniería*. Editorial Trillas; México.



14. Doron, P. y Barnea, D. (1996) Flow pattern maps for solid-liquid flow in pipes
15. EUROMAG International. Medidores de caudal electromagnéticos. *Sensores MUT2200 EL / MUT 2500 EL.*
16. Falcone, G y otros (2007, noviembre 11-14) Multiphase-Flow Modeling Base on Experimental Testing: An Overview of research facilities Worldwide and the Need for Future Developments. Ponencia presentada en la Conferencia y Exhibición técnica Anual 2007. Anaheim, California.
17. Falcone, G., Hewit, G. y Alimonti, C. (2009) Multiphase Flow Metering. 1ª ed. Amsterdam 315 p.
18. Fernández A., Juan J, (2008) Diseño de un Circuito de Flujo de Investigación de Alta Presión para la Investigación Experimental de Líquido de Carga en Pozos de Gas. Trabajo especial de Grado. La Universidad de Zulia
19. García, F., 2004. Factor de fricción para flujo bifásico de gas y líquido en tuberías horizontales para régimen laminar y turbulento. Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.
20. Gómez M., Yenni E., (2005) Diseño de un Banco de Ensayos para el Estudio de Flujo Bifásico Isotermico de gas y de Líquido en Tuberías. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas
21. Kang, C., More, P.P. y Vera, J.R (2006) Flow Patterns and Characteristics in Multiphase riser Pipelines. Ponencia presentada 61<sup>vo</sup> Conferencia y Exposición Anual de Corrosión. Ohio
22. Lyons, W y Plisga, G. (2006). Standard Handbook of Petroleum & Natural Gas Engineering. 2da ed. USA: Elsevier Inc. 1569 p.
23. Norma PDVSA HG-251 Criterios de diseño de soportes para tuberías
24. Norma PDVSA L-TP-1.1 Preparación de diagramas de proceso
25. Norma PDVSA L-TP-1.2 Simbología para planos de proceso
26. Norma PDVSA L-TP-1.3 Identificación de equipos, tuberías de proceso e instrumentos
27. Norma PDVSA L-TP-1.4 Conexiones para muestreo
28. Norma PDVSA MDP-02-FF-06 Flujo bifásico líquido-sólido

29. Pérez, L. (2005). Teoría de la sedimentación. Instituto de ingeniería sanitaria y ambiental.
30. Rietema, K. (1961) *Perfomance and design of hydrocyclone*. Chemical Engineering Science
31. Sabino. C. (1992). El proceso de investigación. Caracas: Panapo C.A. 216p
32. Sampieri, R., Fernández, C y Baptista, P. (2010). Metodología de la Investigación. 5 ed. México: Mc Graw Hill. 613 p.
33. SMAR. Pressure Transmitters. *LD400 series*.
34. SMAR. Remote seal. *SR301*
35. Svarovsky, L. (1984) *Hydrocyclones*. Editorial Holt, Rinehart and Winston Ltd. Reino Unido
36. Tovar, K. e Ibarra, R., 2006. Rediseño y Construcción de un Banco de Ensayos para el Estudio de Flujo de Gas y/o de Líquido Isotérmico en Tuberías., Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.
37. Unicon Estructural. *Tubos y perfiles para uso estructural*.
38. White, F. *Fluids Mechanics*. Editorial Mcgraw-Hill. Cuarta edición

## **APÉNDICES**

## APÉNDICE A. TABLAS

**Tabla A-1. Máxima presión de operación del medidor LD400D**

Material Group	Pressure Class	Maximum Temperature Allowed						
		RT	100	150	200	250	300	350
		Maximum Pressure Allowed (bar)						
10E0 AISI 304/304L	PN 16	16	13.7	12.3	11.2	10.4	9.6	9.2
	PN 25	25	21.5	19.2	17.5	16.3	15.1	14.4
	PN 40	40	34.4	30.8	28	26	24.1	23
	PN 63	63	63	57.3	53.1	50.1	46.8	45
	PN 100	100	86.1	77.1	70	65.2	60.4	57.6
	PN 160	160	137.9	123.4	112	104.3	96.7	92.1
	PN 250	250	215.4	192.8	175	163	151.1	144

**Tabla A-2. Máxima temperatura del medidor LD400D**

Temperature Limits	Ambient:		Process:	
		-40 to 85 °C	(-40 to 185 °F)	-40 to 100 °C
	-40 to 85 °C	(-40 to 185 °F)	0 to 85 °C	(32 to 185 °F) (Inert Halocarbon Oil)
	-20 to 85 °C	(-4 to 185 °F)	-25 to 100 °C	(-13 to 212 °F) (Fluorolube Oil)
	-20 to 85 °C	(-4 to 185 °F)	-40 to 150 °C	(-40 to 302 °F) (Inert Krytox Oil and Fomblim Oil)
	-20 to 85 °C	(-4 to 185 °F)	-40 to 100 °C	(-40 to 212 °F) (Viton O'Ring)
	-20 to 85 °C	(-4 to 185 °F)	-40 to 100 °C	(-40 to 212 °F) (Level Model)
	-20 to 85 °C	(-4 to 185 °F)	-20 to 80 °C	(-4 to 176 °F)
	-20 to 85 °C	(-4 to 185 °F)	-40 to 85 °C	(-40 to 185 °F) (Withou Damage)

**Tabla A-3. Especificaciones de termocupla**

SENSOR	TYPE	2, 3 or 4 wires				DIFFERENTIAL			
		RANGE °C	RANGE °F	MINIMUM SPAN °C	°C DIGITAL ACCURACY*	RANGE °C	RANGE °F	MINIMUM SPAN °C	°C DIGITAL ACCURACY*
RTD	Cu 10 GE	-20 to 250	-4 a 482	50	± 1.0	-270 to 270	-486 to 486	50	± 2.0
	Ni120 Edison Curve #7	-50 a 270	-58 a 518	5	± 0.1	-320 a 320	-576 a 576	5	± 0.5
	Pt50 IEC	-200 to 850	-328 to 1562	10	± 0.25	-1050 to 1050	-1890 to 1890	10	± 1.0
	Pt100 IEC	-200 to 850	-328 to 1562	10	± 0.2	-1050 to 1050	-1890 to 1890	10	± 1.0
	Pt500 IEC	-200 to 450	-328 to 842	10	± 0.2	NA	NA	NA	NA
	Pt1000 IEC	-200 to 300	-328 to 572	10	± 0.2	NA	NA	NA	NA
	Pt50 JIS	-200 to 600	-328 to 1112	10	± 0.25	-800 to 800	-1440 to 1440	10	± 1.0
	Pt100 JIS	-200 to 600	-328 to 1112	10	± 0.25	-800 to 800	-1440 to 1440	10	± 1.5
	Pt100 MILT	-40 a 540	-40 a 1000	10	± 0.2	-580 a 580	-1040 a 1040	10	± 1.0
	Ni120 MILT	-40 a 205	-40 a 400	5	± 0.13	-245 a 245	-440 a 440	5	± 0.5
	Pt100 IEC	-200 a 850	-328 a 1562	10	± 0.2	-1050 a 1050	-1890 a 1890	10	± 1.0
	Pt100 GOST	-200 a 850	-328 a 1562	10	± 0.2	-1050 a 1050	-1890 a 1890	10	± 1.0
	Pt50 GOST	-200 a 850	-328 a 1562	10	± 0.2	-1050 a 1050	-1890 a 1890	10	± 1.0
	Cu100 GOST	-50 a 200	-58 a 392	10	± 0.15	-350 a 350	-450 a 450	10	± 1.0
	Cu50 GOST	-50 a 200	-58 a 392	10	± 0.15	-350 a 350	-450 a 450	10	± 1.0
THERMO-COUPLE	B NBS	100 to 1800	212 to 3272	50	± 0.5**	-1700 to 1700	-3060 to 3060	60	± 1.0**
	E NBS	-100 to 1000	-148 to 1832	20	± 0.2	-1100 to 1100	-1980 to 1980	20	± 1.0
	J NBS	-150 to 750	-238 to 1382	30	± 0.3	-900 to 900	-1620 to 1620	30	± 0.6
	K NBS	-200 to 1350	-328 to 2462	60	± 0.6	-1550 to 1550	-2790 to 2790	60	± 1.2
	N NBS	-100 to 1300	-148 to 2372	50	± 0.5	-1400 to 1400	-2520 to 2520	50	± 1.0
	R NBS	0 to 1750	32 to 3182	40	± 0.4	-1750 to 1750	-3150 to 3150	40	± 2.0
	S NBS	0 to 1750	32 to 3182	40	± 0.4	-1750 to 1750	-3150 to 3150	40	± 2.0
	T NBS	-200 to 400	-328 to 752	15	± 0.15	-600 to 600	-1080 to 1080	15	± 0.8
	L DIN	-200 to 900	-328 to 1652	35	± 0.35	-1100 to 1100	-1980 to 1980	35	± 0.7
	U DIN	-200 to 600	-328 to 1112	50	± 0.5	-800 to 800	-1440 to 1440	50	± 2.5

**Tabla A-4. Especificaciones del encamisado de termocupla**

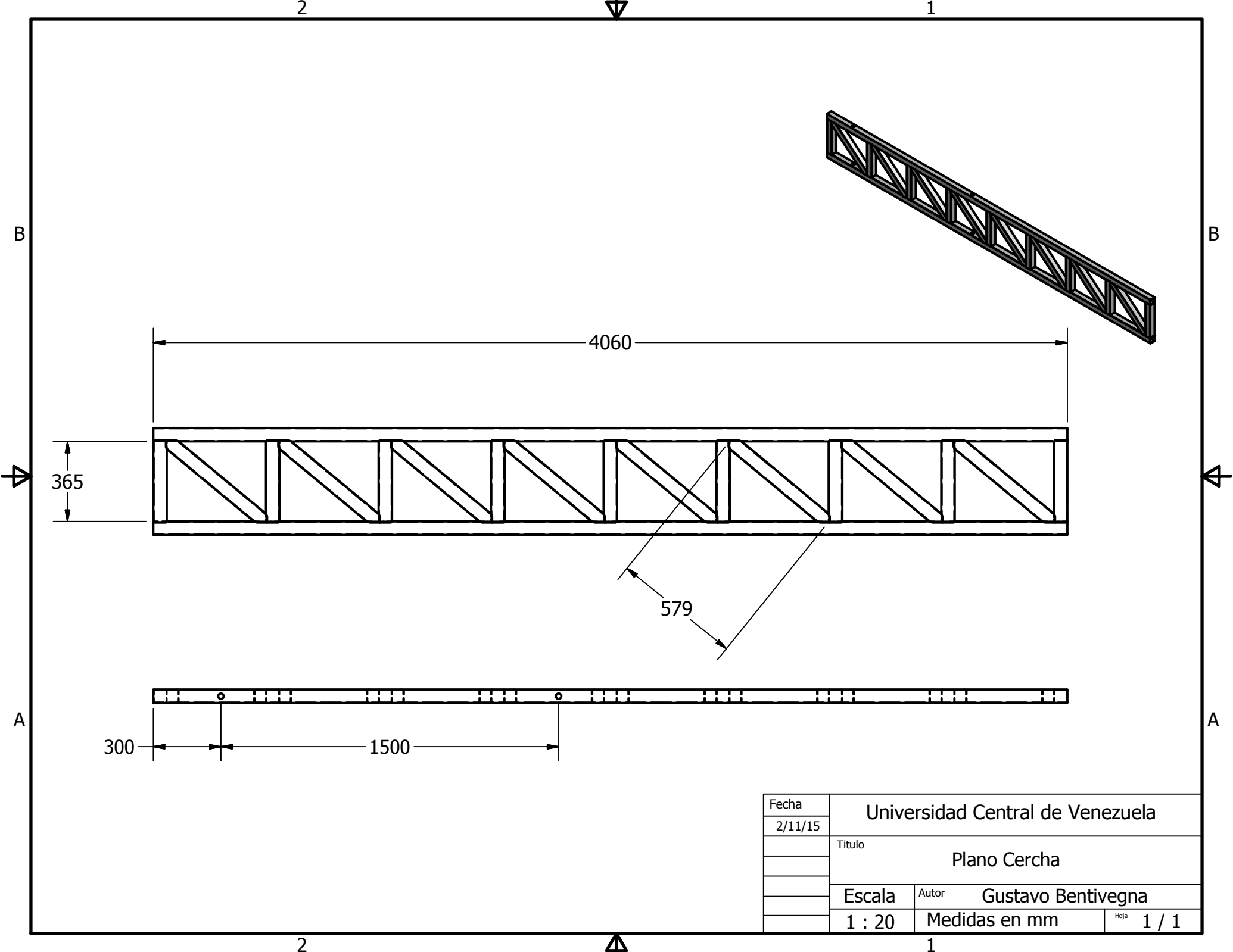
<b>Tipo</b>	<b>Letras de Código</b>	<b>Material</b>	<b>Composición Nominal</b>	<b>Temp. Atm. Oxido</b>	<b>Observaciones</b>
METÁLICOS	AC	Acero de bajo carbono	Acero de bajo carbono	530	Para líquidos y gases no corrosivos.
	FV	Fierro vaciado	Fierro vaciado	700	Atmósferas no corrosivas fundición de aluminio
	304	Acero inoxidable. 304	18% Cr.	900	Buena resistencia a oxidación y corrosión.
			8% Ni.		
	316	Acero inoxidable. 316	12% Cr.	900	Buena resistencia a oxidación y mejor a corrosión por el molibdeno.
			12% Ni.		
			2.5% Mo.		
	310	Acero inoxidable. 310	25% Cr.	1150	Buena resistencia a la corrosión.
			20% Ni.		
			2% Mn.		
	321	Acero inoxidable. 321	18% Cr.	125	Muy buena resistencia a la corrosión ínter angular.
	347	Acero inoxidable. 347	18% Cr.	925	Resistencia a la corrosión extrema.
10% Ni.					
Mo	Monel. 400	67% Ni.	535	Combina alta dureza y flexibilidad y resistente a muchos corrosivos.	
		30% Cu.			
CLS	Calostern	20% Ni.	1100	Excelente resistencia a la oxidación y corrosión. No recomendable para atmósferas sulfurosas.	

	IN8	Incoloy 800	32% Ni	1150	Excelente resistencia a oxidación, carburación y corrosión a elevadas temperaturas. No recomendable para atmósferas sulfurosas.
			20% Cr.		
	OXS	Oxistent	27% Cr.	1150	Excelente resistencia a oxidación y corrosión. Se recomienda para atmósferas sulfurosas.
		73% Fe.			
	IN	Inconel. 600	77% Ni.	1180	Buena resistencia a corrosión, excelente a oxidación en altas temperaturas. No usarse en atmósferas sulfurosas arriba de 500°C.
CERÁMICO	MU	Silma 60% al 203.	60% al 203	1600	Excelente resistencia a choque térmico y buena resistencia mecánica.
	AL	Alox	99.7% al 203	1900	Buena resistencia mecánica y a choque térmico.

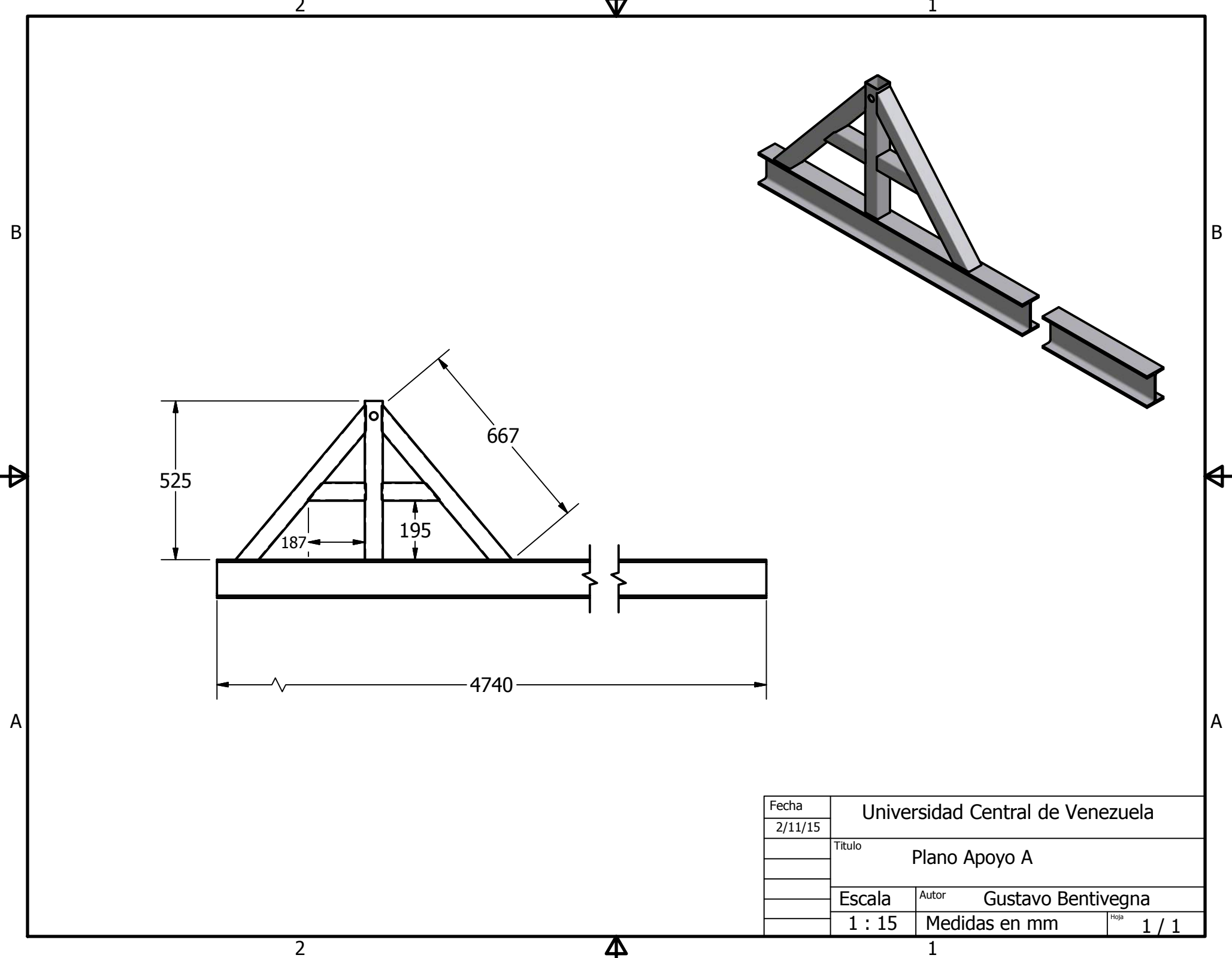
SILICIO	SI	Carburo de Silicio	Carburo de Silicio.	1650	Para uso continuo en aluminio fundido protección secundaria por su resistencia a choque térmico y mecánico.
---------	----	--------------------	---------------------	------	---

## **APÉNDICE B. PLANOS**

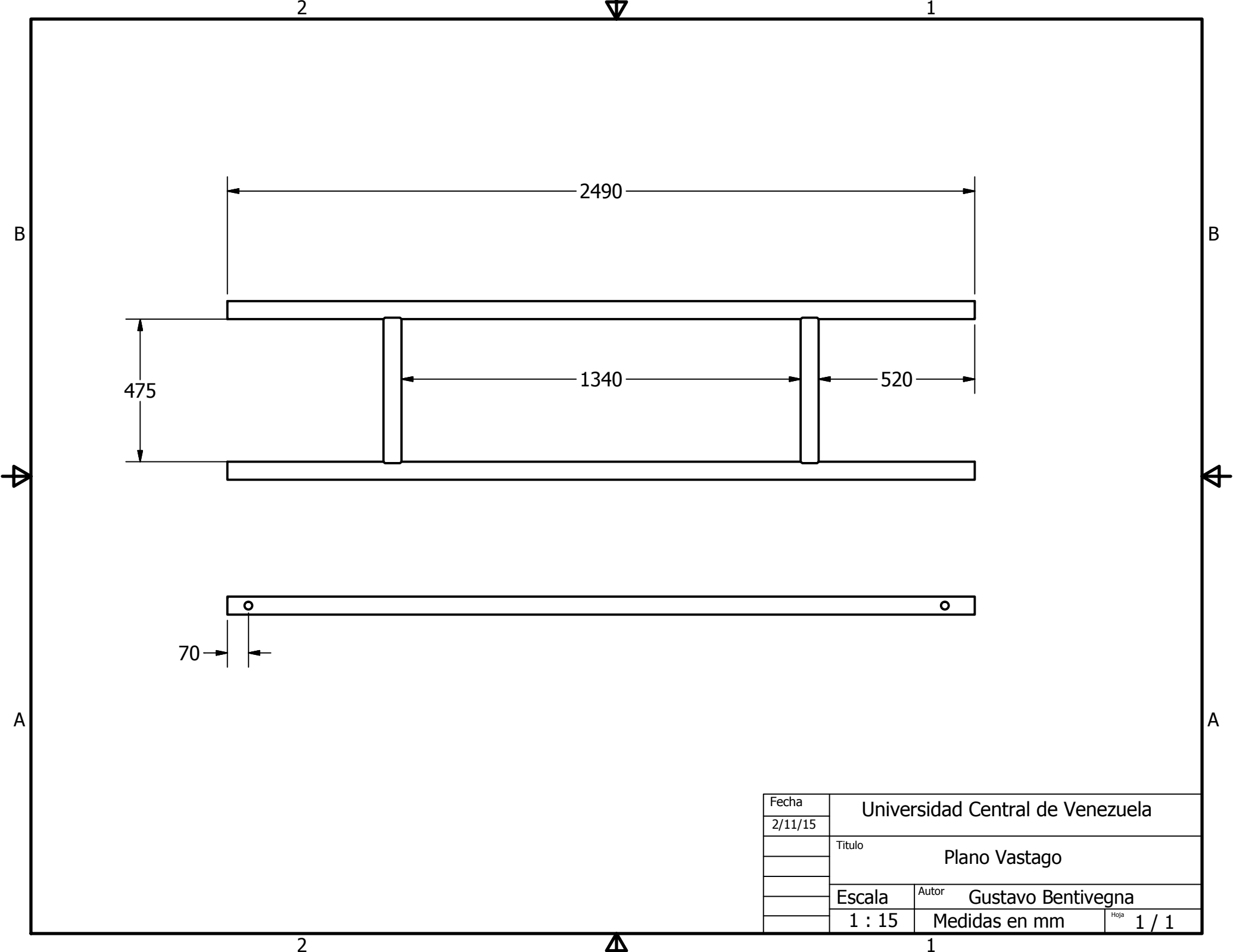




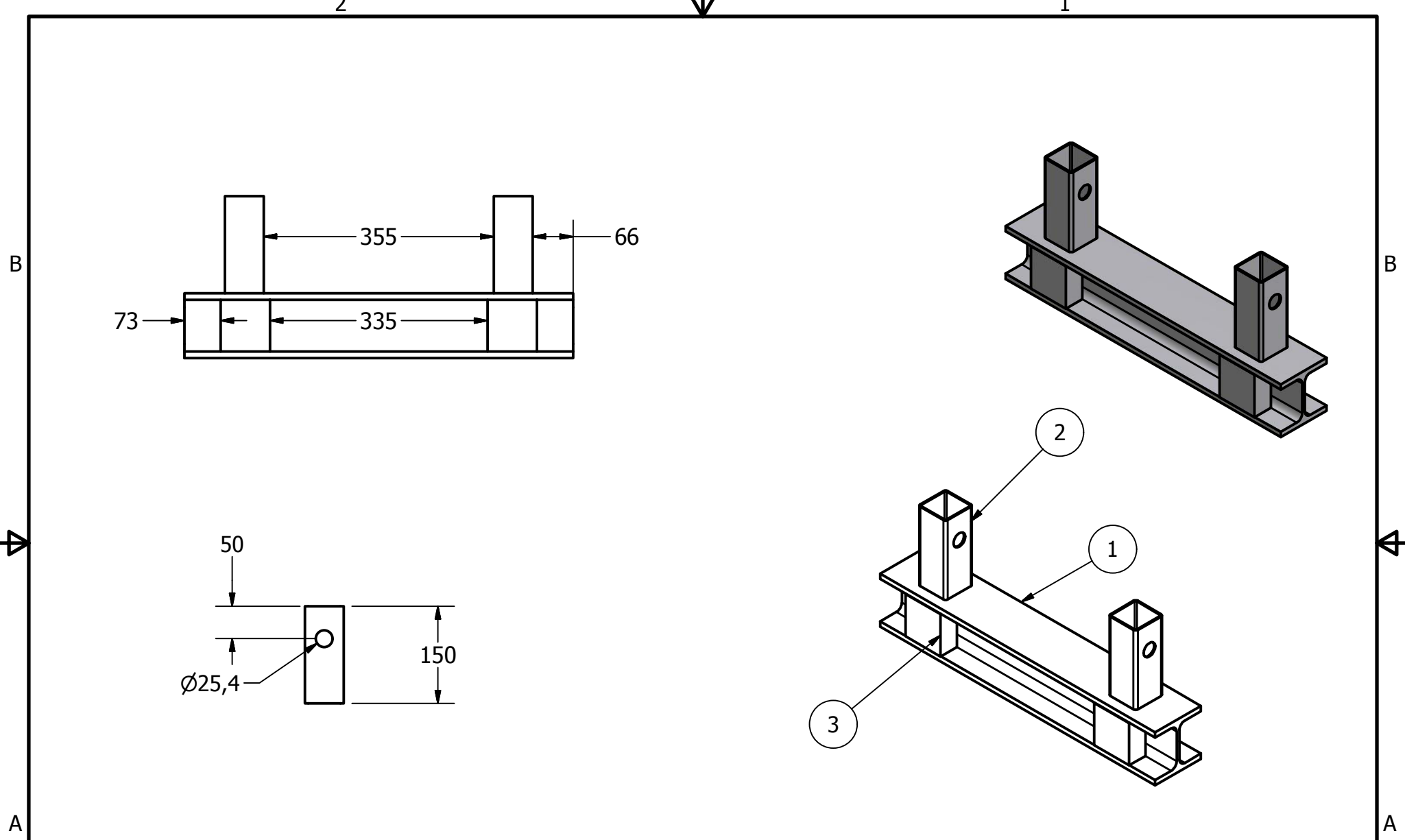
Fecha	Universidad Central de Venezuela		
2/11/15			
	Titulo		
	Plano Cercha		
	Escala	Autor	Gustavo Bentivegna
	1 : 20	Medidas en mm	Hoja 1 / 1



Fecha	Universidad Central de Venezuela		
2/11/15			
	Titulo		
	Plano Apoyo A		
	Escala	Autor	Gustavo Bentivegna
	1 : 15	Medidas en mm	Hoja 1 / 1



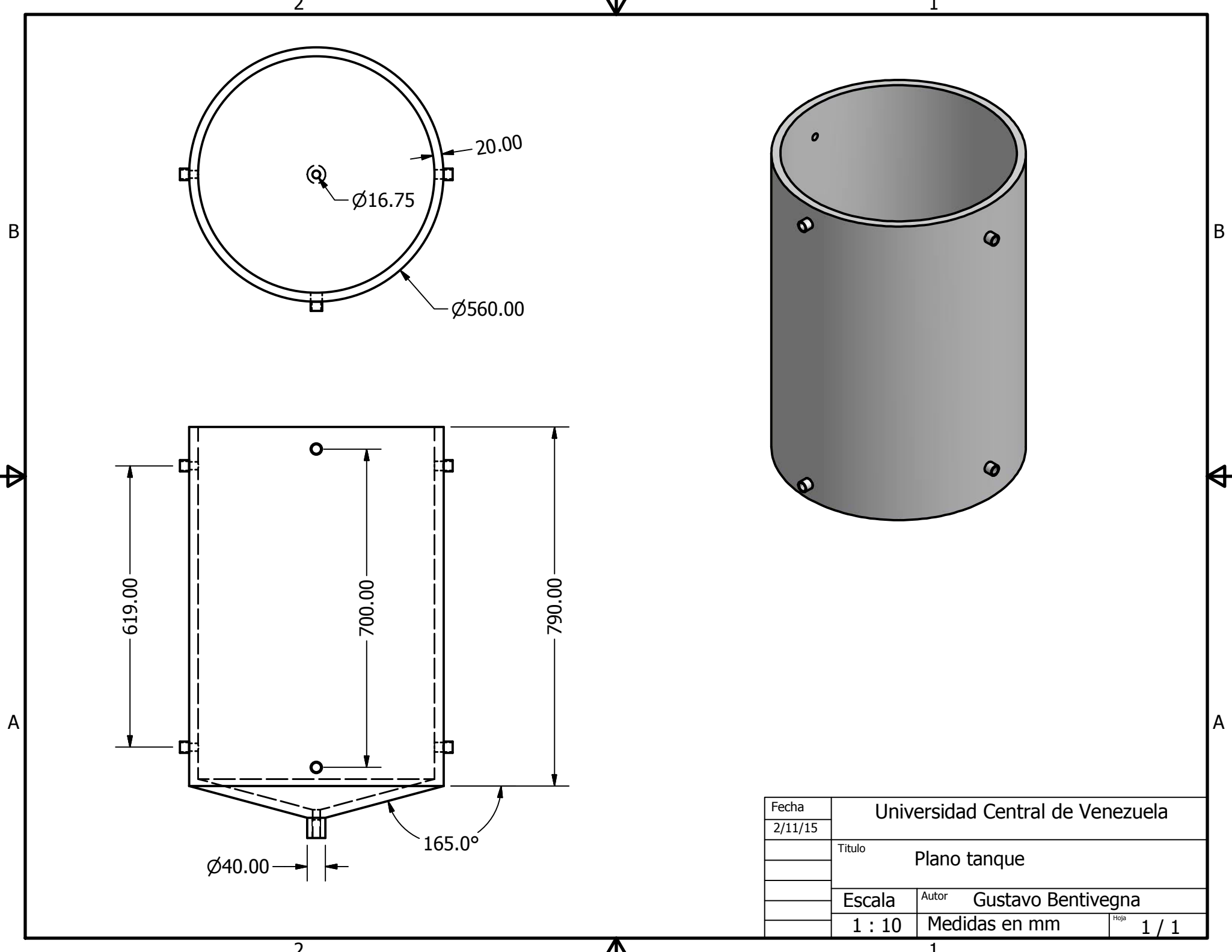
Fecha	Universidad Central de Venezuela		
2/11/15			
	Titulo		
	Plano Vastago		
	Escala	Autor	Gustavo Bentivegna
	1 : 15	Medidas en mm	Hoja 1 / 1



PARTS LIST

ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Viga estructural	
2	2	Base apoyo vastago	
3	2	Soporte	

Fecha	Universidad Central de Venezuela		
2/11/15	Titulo		
	Plano Patin		
	Escala	Autor	Gustavo Bentivegna
	1 : 8	Medidas en mm	Hoja 1 / 1



Fecha	Universidad Central de Venezuela		
2/11/15			
	Titulo	Plano tanque	
	Escala	Autor	Gustavo Bentivegna
	1 : 10	Medidas en mm	Hoja 1 / 1