

**SISTEMA PROTOTIPO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIDROCARBURO
REMANENTE EN POZOS MARGINALES O DE BAJA PRESIÓN**

**JORGE ENRIQUE DUARTE SERRANO
DIEGO MAURICIO QUIROGA MATEUS**

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

2010

**SISTEMA PROTOTIPO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIDROCARBURO
REMANENTE EN POZOS MARGINALES O DE BAJA PRESIÓN**

**JORGE ENRIQUE DUARTE SERRANO
DIEGO MAURICIO QUIROGA MATEUS**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ
Ingeniero Mecánico**

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

2010

DEDICATORIA

A Dios, quien me ayuda a ser lo que soy

A mi País, porque me siento orgulloso de ser Colombiano.

Jorge Enrique Duarte Serrano

DEDICATORIA

A DIOS

A mis padres por su permanente apoyo

A mi País, Colombia.

Diego Mauricio Quiroga Mateus

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por contribuir al crecimiento y progreso de nuestra Nación.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica y todos sus docentes por brindarnos las herramientas necesarias para nuestra formación profesional.

A todos los maestros, que con su esfuerzo y dedicación formaron nuestro carácter profesional y nos exigieron ser los mejores; muy especialmente al Ingeniero Jabid Quiroga por su apoyo y respaldo para sacar adelante nuestras ideas.

A nuestros directores de Proyecto por su permanente orientación y atención al desarrollo y consolidación de este Trabajo de Grado.

A la Escuela de Ingeniería de Petróleos y todos los miembros del Campo Escuela Colorado por permitir el acercamiento a sus áreas del conocimiento, especialmente a la Dra. Zuly Himelda Calderón por motivar nuestro espíritu industrial y brindar su colaboración permanente durante todo este proceso.

A nuestros padres por formarnos en altos valores éticos, morales y sociales, haciéndonos personas de bien, útiles a nuestra sociedad.

A todos nuestros amigos.

Jorge Enrique Duarte Serrano

Diego Mauricio Quiroga Mateus

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	30
1. OBJETIVOS.....	31
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	31
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	31
2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL SISTEMA.....	33
2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO A EMPLEAR.....	34
2.2 PROCESO DE INVESTIGACIÓN.....	35
2.2.1 Diseño de sistemas propuestos.....	37
2.2.1.1 Modelo de prueba 1.....	37
2.2.1.2 Modelo de prueba 2.....	43
2.3 CONFIGURACIÓN ÓPTIMA.....	45
2.3.1 Construcción del modelo físico a escala.....	47
3. DISEÑO DEL SISTEMA.....	48
3.1 COMPONENTES A IMPLEMENTAR.....	49
3.1.1 Diseño de partes y elementos constitutivos.....	52
3.1.1.1 Cable de elevación.....	52
3.1.1.2 Transmisión flexible (bandas y poleas).....	100
3.1.1.3 Marco principal del componente motriz.....	104

3.1.1.4	Ejes.....	110
3.1.1.5	Tambor de arrollamiento.....	147
3.1.1.6	Cilindro base bridado.....	152
3.1.1.7	Cilindro soporte bridado.....	155
3.1.1.8	Cabezal de direccionamiento.....	158
3.1.1.9	Cilindro guía de descarga.....	161
3.1.1.10	Cono limitador.....	163
3.1.1.11	Colector flexible de recuperación.....	165
3.1.1.12	Contrapeso de sumergencia.....	167
3.1.1.13	Tanque de almacenamiento.....	170
3.1.1.14	Soportes de apoyo vertical (trípodes).....	172
3.1.1.15	Sistema de control y potencia.....	174
3.1.1.16	Manguera de conducción a tanque.....	182
3.1.2	Selección de piezas preconstruidas.....	182
3.1.2.1	Motor eléctrico.....	183
3.1.2.2	Cojinetes de elementos rodantes (chumaceras).....	184
3.1.2.3	Válvula serie 150 para seguridad en la boca del pozo.....	189
4.	MODELAMIENTO DEL SISTEMA	191
4.1	DETERMINACIÓN DE VARIABLES.....	191
4.2	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.....	195
4.3	ECUACIONES DE POSICIÓN Y VELOCIDAD EN EL RANGO DE TIEMPO APLICABLE.....	195

4.4 ANÁLISIS DINÁMICO DEL SISTEMA EN <i>MATLAB</i>	198
5. OPERACIÓN DEL SISTEMA.....	208
5.1 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO.....	208
5.1.1 Labores de inspección y mantenimiento.....	212
6. PRUEBA EN CAMPO.....	214
6.1 MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA.....	214
6.1.1 Desempeño mostrado.....	217
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	218
7.1 CONSUMO ENERGÉTICO VS. PRODUCCIÓN.....	218
7.2 RENTABILIDAD Y EFICIENCIA ALCANZADA.....	223
7.3 COSTOS DE DESARROLLO.....	224
8. ALCANCES DEL SISTEMA.....	225
CONCLUSIONES.....	226
RECOMENDACIONES.....	227
BIBLIOGRAFIA.....	228
ANEXOS.....	230

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Tabla 1. Listado de componentes principales implementados en el sistema.....	51
Tabla 2. Caracterización del cable a implementar.....	65
Tabla 3. Factores de seguridad mínimos para cables metálicos.....	69
Tabla 4. Diámetros mínimos sugeridos.....	71
Tabla 5. Decremento en resistencia y vida de servicio de cables.....	72
Tabla 6. Presión máxima de contacto permisible de cables sobre ranuras de poleas.....	74
Tabla 7. Valores típicos de resistencia a la rotura Su.....	76
Tabla 8. Posibles combinaciones geométricas del esquema de transmisión seleccionado.....	84
Tabla 9. Factores de servicio para bandas en V.....	91
Tabla 10. Longitudes de banda estándar.....	94
Tabla 11. Factor de corrección por ángulo de contacto.....	95
Tabla 12. Factor de corrección por longitud de banda.....	96
Tabla 13. Parámetros de diseño obtenidos en la primera etapa de transmisión.....	97
Tabla 14. Parámetros de diseño obtenidos en la segunda etapa de transmisión.....	103
Tabla 15. Diámetros establecidos para el eje del tambor de arrollamiento.....	136
Tabla 16. Diámetros mínimos establecidos para el eje intermedio.....	146
Tabla 17. Especificaciones en tubería de PVC.....	162
Tabla 18. Comportamiento ascendente del sistema (elevación).....	194

Tabla 19. Comportamiento descendente del sistema.....	194
Tabla 20. Aceleraciones y fuerzas instantáneas en el sistema.....	207
Tabla 21. Actividades de inspección y mantenimiento del sistema.....	213
Tabla 22. Precios promedio del barril de petróleo en Colombia.....	220
Tabla 23. Costos globales de desarrollo del sistema.....	224

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso de recuperación secundaria mediante bombeo mecánico e inyección.....	33
Figura 2. Principio de aljibe aplicado en un antiguo pozo de agua.....	35
Figura 3. Sistema de extracción existente en campo escuela Colorado.....	36
Figura 4. Esquema de los componentes principales de la primera propuesta.....	38
Figura 5. Modelamiento en computador del primer prototipo.....	39
Figura 6. Modelo físico del prototipo inicial.....	39
Figura 7. Esquema de los componentes principales de la segunda propuesta.....	44
Figura 8. Esquema y disposición plana de los componentes principales del prototipo apropiado.....	45
Figura 9. Nombre y símbolo del sistema prototipo.....	46
Figura 10. Modelo físico a escala del sistema prototipo.....	47
Figura 11. Esquema de componentes 1.....	49
Figura 12. Esquema de componentes 2.....	50
Figura 13. Esquema de componentes 3.....	50
Figura 14. Sección transversal típica de un cable de acero.....	53
Figura 15. Configuraciones comunes de cables metálicos.....	53
Figura 16. Sección transversal seleccionada (6x7).....	55
Figura 17. Fuerzas sobre el cable de levantamiento.....	56
Figura 18. Balanza de precisión para la determinación de la carga asociada al peso propio del cable.....	58
Figura 19. Columna de crudo recuperado.....	59

Figura 20. Diagrama de fuerzas sobre el elemento recolector.....	61
Figura 21. Muestras de cables analizados en laboratorio.....	63
Figura 22. Determinación en el laboratorio de las propiedades mecánicas de las muestras de cables.....	64
Figura 23. Deformación del cable a implementar bajo estado de carga.....	65
Figura 24. Pronóstico de vida útil hasta la fatiga en cables metálicos.....	77
Figura 25. Ubicación de los elementos secundarios de transmisión de potencia.....	81
Figura 26. Diferentes configuraciones geométricas propuestas para el sistema de transmisión.....	82
Figura 27. Distribución del esquema de transmisión seleccionado.....	83
Figura 28. Potencia demandada y potencia disponible en el sistema.....	87
Figura 29. Selección de bandas en V industriales.....	91
Figura 30. Potencia nominal por banda.....	92
Figura 31. Distribución en planta del componente motriz.....	105
Figura 32. Distancias de pre-tensionamiento disponible (rojo).....	106
Figura 33. Construcción virtual del marco principal del componente motriz.....	107
Figura 34. Estado de esfuerzos en el marco principal.....	108
Figura 35. Deformaciones elásticas en el marco principal bajo carga.....	108
Figura 36. Perfil estructural 2" x 1/8" que conforma el marco principal.....	109
Figura 37. Marco principal del componente motriz construido.....	110
Figura 38. Diámetros a calcular en el eje del tambor de arrollamiento.....	111
Figura 39. Disposición de elementos sobre el eje del tambor de arrollamiento.....	112
Figura 40. Fuerzas sobre la polea A.....	114
Figura 41. Fuerzas de la polea A sobre el eje.....	115
Figura 42. Fuerzas sobre el cilindro base del tambor de arrollamiento.....	116
Figura 43. Componentes de carga sobre el eje para el caso 1.....	117

Figura 44. Componentes de carga sobre el eje para el caso 2.....	118
Figura 45. Componentes de carga sobre el eje para el caso 3.....	120
Figura 46. Distribución general de fuerzas para el caso 1.....	122
Figura 47. Distribución general de fuerzas para el caso 2.....	123
Figura 48. Distribución general de fuerzas para el caso 3.....	124
Figura 49. Diagramas correspondientes al caso 1 para el Plano Y – Z.....	125
Figura 50. Diagramas correspondientes al caso 1 para el Plano X – Z.....	125
Figura 51. Diagramas correspondientes al caso 2 para el Plano Y – Z.....	126
Figura 52. Diagramas correspondientes al caso 2 para el Plano X – Z.....	126
Figura 53. Diagramas correspondientes al caso 3 para el Plano Y – Z.....	127
Figura 54. Diagramas correspondientes al caso 3 para el Plano X – Z.....	127
Figura 55. Eje del tambor de arrollamiento diseñado.....	136
Figura 56. Diámetros a calcular en el eje de la polea intermedia para transmisión de potencia.....	137
Figura 57. Disposición de elementos sobre el eje de la polea intermedia.....	138
Figura 58. Fuerzas de las poleas A y C sobre el eje intermedio.....	140
Figura 59. Fuerzas sobre la polea C.....	140
Figura 60. Distribución general de fuerzas sobre el eje de la polea intermedia.....	141
Figura 61. Diagramas correspondientes al plano Y – Z.....	143
Figura 62. Diagramas correspondientes al plano X – Z.....	143
Figura 63. Eje de la polea intermedia para transmisión de potencia diseñado.....	146
Figura 64. Tambor de arrollamiento en componente motriz.....	147
Figura 65. Aseguramiento interno y externo del cable al tambor.....	148
Figura 66. Tambor de arrollamiento construido.....	149
Figura 67. Torque transmitido por fricción.....	150
Figura 68. Estado de esfuerzos en el cilindro base del tambor.....	151

Figura 69. Deformaciones elásticas en el cilindro base bajo carga.....	152
Figura 70. Cilindro base bridado de acople.....	153
Figura 71. Estado de esfuerzos en brida base por carga y presión respectivamente.....	154
Figura 72. Deformaciones elásticas en brida base por carga y presión respectivamente.....	155
Figura 73. Cilindro de soporte del cabezal construido.....	156
Figura 74. Estado de esfuerzos en el cilindro de soporte del cabezal.....	157
Figura 75. Deformaciones elásticas en el cilindro de soporte del cabezal.....	157
Figura 76. Ubicación del cabezal de direccionamiento en el sistema.....	158
Figura 77. Accesorios utilizados en el montaje del cabezal de direccionamiento.....	159
Figura 78. Cabezal de direccionamiento construido.....	160
Figura 79. Estado de esfuerzos y deformaciones respectivas por presión en el cabezal de direccionamiento.....	161
Figura 80. Cilindro guía de descarga implementado.....	163
Figura 81. Funciones del cono limitador.....	164
Figura 82. Cono limitador construido.....	164
Figura 83. Colector flexible de recuperación implementado.....	166
Figura 84. Fuerzas presentes en el elemento flexible recolector durante la descarga.....	168
Figura 85. Contrapeso de sumergencia construido.....	170
Figura 86. Tanque de almacenamiento implementado.....	171
Figura 87. Soportes de apoyo construidos.....	172
Figura 88. Estado de esfuerzos y deformaciones respectivas en guía vertical.....	173
Figura 89. Estado de esfuerzos y deformaciones respectivas en barras inclinadas de apoyo.....	174
Figura 90. Etapas del proceso de recuperación del crudo remanente.....	175

Figura 91. Esquema de la secuencia de trabajo por niveles de profundidad.....	176
Figura 92. Tablero de control implementado en el sistema.....	176
Figura 93. Diagrama de conexión eléctrica de la llave de giro conmutable.....	179
Figura 94. Diagrama de conexión eléctrica de los indicadores luminosos.....	180
Figura 95. Diagrama eléctrico de la conexión general del sistema.....	181
Figura 96. Manguera implementada de conducción a tanque del crudo recuperado.....	182
Figura 97. Motor eléctrico implementado.....	184
Figura 98. Ubicaciones en el sistema de las chumaceras.....	185
Figura 99. Posición de los rodamientos del tambor.....	186
Figura 100. Posición de los rodamientos del eje de la polea intermedia....	187
Figura 101. Rodamientos de pedestal implementados.....	189
Figura 102. Válvula serie 150 implementada en el sistema.....	190
Figura 103. Variables esquematizadas en el tambor de arrollamiento.....	192
Figura 104. Diagrama de flujo diseñado para el proceso.....	199
Figura 105. Entorno gráfico para la elevación.....	201
Figura 106. Desplazamiento del sistema durante la elevación.....	201
Figura 107. Velocidad del sistema durante el ascenso.....	202
Figura 108. Entorno gráfico para el descenso.....	204
Figura 109. Desplazamiento del sistema durante el descenso.....	204
Figura 110. Velocidad del sistema durante el descenso.....	205
Figura 111. Descenso y recuperación de crudo en la profundidad de la tubería de producción.....	210
Figura 112. Vista detallada del cono limitador.....	211
Figura 113. Ascenso y descarga del crudo extraído por el sistema.....	212
Figura 114. Distribución en planta del montaje del sistema.....	215

Figura 115. Conexión del sistema en zona de pruebas.....	215
Figura 116. Sistema ensamblado en la zona de pruebas.....	216
Figura 117. Vista lateral del sistema en la zona de pruebas.....	216
Figura 118. Evolución del precio del barril de petróleo WTI durante los dos últimos años.....	219

Figura 1. Proceso de recuperación secundaria mediante bombeo mecánico e inyección.....	33
---	----

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Vista general del sistema prototipo.....	231
ANEXO B. Conjunto transmisión flexible.....	232
ANEXO B1. Bastidor principal de la transmisión flexible.....	233
ANEXO B2. Bastidor de soporte poleas intermedias.....	234
ANEXO B3. Polea pequeña acoplada al motor.....	235
ANEXO B4. Polea pequeña intermedia de la transmisión flexible.....	236
ANEXO B5. Polea grande intermedia de la transmisión flexible.....	237
ANEXO B6. Polea grande del tambor de enrollamiento.....	238
ANEXO B7. Eje tambor de enrollamiento.....	239
ANEXO B8. Eje intermedio de la transmisión flexible.....	240
ANEXO B9. Chumacera del eje tambor de enrollamiento.....	241
ANEXO B10. Chumacera del eje intermedio.....	242
ANEXO B11. Cilindro base del tambor de enrollamiento.....	243
ANEXO B12. Tapa tambor de enrollamiento.....	244
ANEXO B13. Perfil de soporte tablero de control.....	245
ANEXO B14. Tornillo de apriete tablero de control.....	246
ANEXO B15. Apoyo principal inferior del tablero de control.....	247
ANEXO B16. Apoyo secundario superior del tablero de control.....	248
ANEXO B17. Tablero de control.....	249
ANEXO B18. Perfil soporte motor eléctrico.....	250
ANEXO C. Conjunto bridas y válvula de seguridad.....	251
ANEXO C1. Cuerpo inferior de la válvula de seguridad.....	252
ANEXO C2. Cuerpo superior de la válvula de seguridad.....	253

ANEXO C3. Cortina y varilla roscada.....	254
ANEXO C4. Prensa estopas.....	255
ANEXO C5. Buje superior roscado del volante.....	256
ANEXO C6. Volante.....	257
ANEXO C8. Brida sección 1.....	258
ANEXO C9. Brida sección 2.....	259
ANEXO D. Conjunto Cabezal de direccionamiento.....	260
ANEXO D1. Buje cónico reductor.....	261
ANEXO D2. Acople de buje cónico.....	262
ANEXO D3. Tubería guía final del cabezal.....	263
ANEXO D4. Codo de 45 grados.....	264
ANEXO D5. Tubería guía central del cabezal.....	265
ANEXO D6. Tubería guía inicial del cabezal.....	266
ANEXO E. conjunto [y] de derivación.....	267
ANEXO E1. Triple [y] de derivación de hidrocarburo y desfogue.....	268
ANEXO E2. Buje de unión entre [Y] de derivación y tapa de sellado.....	269
ANEXO E3. Tapa de rosca de sellado.....	270
ANEXO E4. Tubo seccion1 desfogue de gas.....	271
ANEXO E5. Codo 90 grados.....	272
ANEXO E6. Tubo seccion2 desfogue de gas.....	273
ANEXO E7. Tubo sección 3 descarga de gas.....	274
ANEXO E8. Acople para tubería descarga hidrocarburo y gas.....	275
ANEXO E9. Filtro exterior de gas.....	276
ANEXO E10. Buje para tubería de descarga de hidrocarburo.....	277
ANEXO E11. Tubo de descarga de hidrocarburo.....	278

ANEXO E12. Tubería inclinada de direccionamiento.....	279
ANEXO E13. Cono de filtrado.....	280
ANEXO F. Conjunto de almacenamiento de hidrocarburo.....	281
ANEXO F1. Tanque de almacenamiento.....	282
ANEXO F2. Filtro de descarga de gas.....	283
ANEXO F3. Acople roscado para tubería de descarga de hidrocarburo....	284
ANEXO F4. Buje para tubería de descarga hidrocarburo.....	285
ANEXO F5. Tubería de descarga.....	286
ANEXO G. Conjunto trípode de 45 grados.....	287
ANEXO G1. Base guía móvil central del trípode.....	288
ANEXO G2. Barras o perfiles de apoyo trípode.....	289
ANEXO G3. Polea guía de cable.....	290
ANEXO G4. Tubo móvil de graduación de alturas.....	291
ANEXO H. Conjunto trípode de 30 grados.....	292
ANEXO H1. Base guía móvil central del trípode.....	293
ANEXO H2. Barras o perfiles de apoyo trípode.....	294
ANEXO H3. Semicilindro de apoyo.....	295
ANEXO H4. Barra móvil de graduación de altura.....	296
ANEXO I. Conjunto elemento recolector.....	297
ANEXO I1. Buje acople al elemento recolector.....	298
ANEXO I2. Tapa del acople elemento recolector.....	299
ANEXO J. Contrapeso de sumergencia.....	300

GLOSARIO

APLASTAMIENTO: Fenómeno mecánico, producto de la deformación permanente de la estructura interna de un material por efecto de una compresión.

CAD (COMPUTER ASSISTED DESIGN): Sigla en inglés para referirse al diseño asistido por computadora.

CARGA ELECTROSTÁTICA: Carga eléctrica estática generada por la acción del rozamiento de dos materiales o por la inducción de un campo magnético.

CASING: Tubería metálica de soporte mas externa al conjunto de ductos que por ella descienden para llevar a cabo la extracción de petróleo.

COLECTOR: Elemento que recoge o agrupa una sustancia u otros elementos.

CONMUTABLE: Que permite alternar el sentido o la posición.

CONSERVATIVO: Que procura mantener o preservar altos niveles de seguridad y fiabilidad en su actividad.

CORROSIÓN: Fenómeno que ocurre cuando un metal, en determinadas condiciones ambientales, se combina con el oxígeno formando un óxido, hidróxido o un complejo químico. Hay factores que favorecen la corrosión como son la presencia de cloruros, fluoruros, bromuros, nitratos y

especialmente anhídrido sulfuroso, es favorable su formación en una humedad relativa superior a un 70%.

CRITICIDAD: Condición o estado de un elemento o sistema que lo caracteriza por ser propenso a presentar algún problema o complicación.

CRUDO: Fase líquida en la que puede ser encontrado el hidrocarburo.

CUPLA: Unión sintética de tipo cilíndrico para acoplar dos piezas concordantes una con otra.

EMANAR: Desalojo o flujo libre de salida de una sustancia gaseosa.

EXTRACCIÓN: Acción correspondiente al desalojo de un cuerpo o una sustancia de su lugar inicial de permanencia.

FLUCTUACIONES: Variación periódica o estado aleatorio en el comportamiento de un evento.

HIDROCARBURO: Compuesto orgánico formado únicamente por átomos de carbono e hidrógeno. Consisten en un armazón de carbono al que se unen átomos de hidrógeno, formando el esqueleto de la materia orgánica. Las cadenas de carbonos pueden ser lineales o ramificadas, abiertas o cerradas.

INCRUSTACIÓN: Fenómeno físico que se origina por la adhesión o agregado permanente de una sustancia al contorno o superficie de otra, cambiando las propiedades del conjunto.

INTERFASE: Límite de contacto entre dos fases o zonas bien definidas.

IZAMIENTO: Alzar o levantar una carga a una mayor altura.

MANÓMETRO: Dispositivo para el sensado y control de presión.

MARGINAL: Estado en el cual un pozo se encuentre al límite económico en su productividad o en bajas condiciones de capacidad de levantamiento propio.

MECANIZABLE: Cualidad que refleja la característica de dejarse manejar mediante herramientas o procesos mecánicos.

MONOFÁSICO: De una sola fase.

PETRÓLEO: Mezcla heterogénea de compuestos orgánicos, principalmente Hidrocarburos insolubles en agua. De origen fósil, fruto de la transformación de materia orgánica procedente de zooplancton y algas que, depositados en grandes cantidades en fondos anóxicos de mares o zonas lacustres del pasado geológico, fueron posteriormente enterrados bajo pesadas capas de sedimentos, que mediante La transformación química debida al calor y a la presión se fueron formando.

POLICLORURO DE VINILO (PVC): Es un producto resultado de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo a policloruro de vinilo. La resina que resulta de esta polimerización es la más versátil de la familia de los plásticos; pues además de ser termoplástica, de ella se pueden obtener productos rígidos y flexibles.

POLÍMERO: sustancia que consiste en grandes moléculas formadas por muchas unidades pequeñas que se repiten, llamadas monómeros. El número de unidades que se repiten en una molécula grande se llama grado de polimerización.

REMANENTE: Que permanece aislado o no utilizado después de un determinado proceso inicial.

SUMERGENCIA: Ingreso de un cuerpo al interior de una fase líquida

TENACIDAD: Propiedad mecánica de los materiales que indica la capacidad para resistir cargas de impacto.

NOMENCLATURA

NOTACIÓN

A_s = área superficial

D = diámetro externo

E = modulo de elasticidad

F_N = fuerza impulsora neta

ρ = densidad del liquido

H_p = potencia en caballos de fuerza

I = momento de inercia

K = Conductividad térmica

L = longitud

m = masa

N = fuerza normal

P_d = potencia de diseño

P_{nc} = potencia nominal corregida

S_n = resistencia a la fatiga

$S_{n'}$ = resistencia modificada a la fatiga

σ_p = valor de esfuerzo permisible

σ_t = esfuerzo de tensión

LETRAS GRIEGAS

ρ = presión del liquido

μ_d = coeficiente de fricción por rozamiento dinámico

RESUMEN

TITULO:

SISTEMA PROTOTIPO PARA LA EXTRACCIÓN DE HIDROCARBURO REMANENTE EN POZOS MARGINALES O DE BAJA PRESIÓN*

AUTORES: Jorge Enrique Duarte Serrano.
Diego Mauricio Quiroga Mateus. **

PALABRAS CLAVES:

Extracción de Hidrocarburo, Casing, Colector de recuperación, Reactivación de pozos, Estado marginal, Crudo remanente, Sumergencia, Izamiento, Principio de aljibe.

DESCRIPCIÓN:

Este proyecto propone un sistema mecánico prototipo para llevar a cabo la reactivación de pozos de hidrocarburo que han sido abandonados por encontrarse en estado marginal, carecer de presión o no ser rentable su explotación por medio de sistemas convencionales de levantamiento.

El agotamiento mundial de las reservas de hidrocarburo conocidas constituye un grave problema para nuestro actual sistema energético que continuamente incrementa su demanda. Con la intención de colaborar a subsanar dicha crisis por desabastecimiento en el sector petrolero, e intentando contribuir al progreso y desarrollo de la industria nacional, se ha realizado todo un proceso investigativo que se ha consolidado en el diseño y la construcción de un equipo sencillo, efectivo, económico y rentable, el cual operando en base al principio de funcionamiento de un aljibe que implementa un elemento flexible de tracción y otro de almacenamiento, está en capacidad de descender 3280 pies de profundidad para llevar a cabo una recuperación diaria de crudo remanente de aproximadamente 12 barriles, empleando un consumo eléctrico inferior a 0.75 KW.

El sistema diseñado incorpora todos los componentes establecidos para su propósito y es puesto en marcha en condiciones prácticas para determinar su desempeño y eficiencia.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Ing. Javid Eduardo Quiroga Méndez

ABSTRACT

TITLE:

PROTOTYPE SYSTEM FOR OIL REMNANT EXTRACTION IN MARGINALS OR LOW PRESSURE WELLS*

AUTHORS: Jorge Enrique Duarte Serrano.
Diego Mauricio Quiroga Mateus. **

KEY WORDS:

Oil Extraction, Casing, Recovery Element, Wells reactivation, marginal condition, Remnant oil, Oil Petroleum, immersed, Lift up, water well principle.

DESCRIPTION:

This project propose a mechanical prototype system for reactivation of abandoned oil petroleum wells that presents low pressure ratings, and are not profitable to exploit them through conventional lifting methods.

Oil petroleum world reserves exhausting, becomes in a huge problem to our global energy system that constantly increase their demands. In order to contribute increasing oil production and developing national industry has been made the design and construction of a system that works according to the behavior of a simple water well. This system is able to descent 3280 feet and makes a recovery around 12 barrels per day using a low energy consumption, less than 0.75 kW.

The system designed implement all the devices established for their purpose and is running on outsides to determine their performance and efficiency.

* Project of Grade

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering, Mechanical Engineering school, Ing. Jabid Eduardo Quiroga Méndez

INTRODUCCIÓN

Ante la inmensa y creciente necesidad global de hidrocarburo, el hombre ha llevado a cabo un sinnúmero de actividades encaminadas a la obtención del mismo, para de esta manera intentar satisfacer la constante demanda y los elevados requerimientos energéticos. Actualmente, el agotamiento de las reservas mundiales de petróleo constituye un grave problema, pues al ritmo actual de consumo los depósitos conocidos se acabarán en muy poco tiempo.

Este proyecto plantea una propuesta de solución a la situación anteriormente mencionada mediante el diseño y la construcción de un sistema de levantamiento mecánico no convencional para la extracción de hidrocarburo remanente en pozos abandonados, marginales o de baja presión.

De esta manera una posible implementación en campo de un equipo como el diseñado permitirá la reactivación de zonas potencialmente muy productivas que aún mantienen volúmenes de hidrocarburo que pueden ser extraídos a un bajo costo, prolongando al máximo su estado activo y generando progreso y crecimiento económico para nuestra nación.

El sistema opera bajo el principio de funcionamiento de un aljibe, el cual eleva un fluido desde una determinada profundidad haciendo uso de un elemento flexible de tracción y otro de almacenamiento. De igual modo los componentes implementados en el mismo fueron calculados para que la operación de recuperación del crudo fuera sencilla, efectiva y rentable.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir con el desarrollo investigativo de nuevas tecnologías que promuevan el progreso industrial de nuestro país, contemplado en la misión de la Universidad Industrial de Santander, desarrollando el diseño y la construcción de un sistema prototipo para la extracción de hidrocarburo remanente en pozos marginales o de baja presión.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diseñar y construir un sistema para la extracción de hidrocarburo remanente en pozos abandonados, marginales o de baja presión, empleando el principio de funcionamiento de un aljibe e implementando el esquema de componentes mostrado en las páginas 46 y 47 (*Fig.11-12-13*); el cual este en capacidad de llevar a cabo la recuperación de aproximadamente 12 barriles de crudo en 24 horas trabajando hasta una profundidad máxima de 1000 metros y empleando una potencia eléctrica inferior a 0.75 KW.

- ✓ Llevar a cabo un estudio del consumo energético empleado por el sistema prototipo, frente a los valores de hidrocarburo recuperado, con el ánimo de determinar la rentabilidad que ofrece el equipo al momento de encontrarse operando.

- ✓ Valorar el desempeño y la eficiencia alcanzada así como los costos de desarrollo del sistema.

- ✓ Presentar el diseño en planos de construcción en *Solid Works (software)*, así como el análisis dinámico en el programa *Matlab*.

2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL SISTEMA

El empleo de sistemas convencionales como lo es el “balancín” o “machin”, para llevar a cabo la tarea de extracción de hidrocarburo y cumplir con la etapa de recuperación secundaria en el proceso para la obtención del mismo, constituye sin duda alguna el método más generalizado y común a nivel mundial.

Como es bien sabido si el yacimiento tiene energía propia, generada por la presión subterránea y por los elementos que acompañan al petróleo (por ejemplo, agua y gas), este saldrá por sí solo. En este caso se instala en la cabeza del pozo un conjunto de válvulas para regular el paso del petróleo. Si no existe esa presión, y teniendo en cuenta que durante la vida del yacimiento, esta última descenderá, será necesario usar otras técnicas para la extracción, como por ejemplo bombas mecánicas, la inyección de agua o la inyección de gas, entre otras.

Figura 1. Proceso de recuperación secundaria mediante bombeo mecánico e inyección



Fuente: <http://www.crisisenergética.org>

Claramente los métodos empleados son numerosos, el más común es un equipo mecánico, anteriormente mencionado, que mediante un permanente balanceo acciona una bomba en el fondo del pozo que succiona el petróleo hacia la superficie. Este bombeo se realiza hasta el momento en que el coste del sistema de extracción es mayor que la rentabilidad que se obtiene del petróleo, por lo que el pozo es *abandonado*.

Los cálculos realizados históricamente permiten afirmar que habitualmente una bolsa de petróleo sólo suele ser aprovechada entre un 25% y un 50% (fuente, Prias Guillermo) de su capacidad total. Lo cual hace pensar en la inimaginable cantidad de hidrocarburo que permanece remanente en cada uno de los miles de pozos que se encuentran abandonados en el planeta.

Considerando dicha situación, se ha trabajado teniendo como objetivo primordial el desarrollo de un sistema no convencional que pretende continuar con la explotación de dichos pozos marginales a un costo de operación muy bajo, derivado del principio de funcionamiento distinto sobre el cual se basa su diseño.

2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO A EMPLEAR

El hecho de operar bajo un principio no convencional en el ámbito de la extracción de hidrocarburos, muestra una nueva posibilidad para el desarrollo y consolidación de tecnologías distintas que abren las puertas del progreso y del crecimiento intelectual para aquellos que son gestores, promotores y líderes del cambio que apunta hacia el éxito.

Esto permite mencionar en este punto la esencia que compone nuestro sistema, y provoca su desempeño sencillo, preciso, efectivo y confiable. No

siendo nada extraordinario todo está fundamentado bajo el funcionamiento de un ALJIBE, que es tan común y conocido desde las épocas más antiguas de la humanidad.

Figura 2. Principio de aljibe aplicado en un antiguo pozo de agua



Fuente: <http://www.google/imágenesdepozo.com/>

2.2 PROCESO DE INVESTIGACIÓN

Lograr conseguir el diseño de un nuevo sistema; efectivo, sencillo y económico, concebido para realizar la extracción de hidrocarburo, demanda un gran trabajo que implica todo un proceso de recolección de información, identificación y reconocimiento de elementos existentes así como actividades encaminadas a lograr un entendimiento del conocimiento adquirido a través del tiempo, relacionado con el tema en cuestión.

Es de resaltar esta situación, puesto que en la realización de este proyecto no se tiene una referencia o modelo de antemano sobre el cual comenzar a trabajar, hecho que implica discurrir en un procedimiento que involucra una serie de pasos y labores para encontrar y crear una relación de partes y componentes tales, que presenten en su combinación originalidad y funcionalidad.

Teniendo lo anteriormente mencionado como propósito, se llevó a cabo gracias a la colaboración de la facultad de ingenierías fisicoquímicas de la universidad Industrial de Santander una visita al campo escuela Colorado, en donde se tuvo la oportunidad de conocer el actual sistema de extracción por bombeo mecánico, para de esta forma ayudar a consolidar de manera práctica el conocimiento investigado, teniendo así mayores herramientas y criterios para abordar la tarea de diseño.

Figura 3. Sistema de extracción existente en campo escuela Colorado



Fuente: foto tomada en el campo escuela Colorado

2.2.1 Diseño de sistemas propuestos.

Llevada a cabo previamente la actividad investigativa, entendiendo el proceso de extracción, así como hecha la identificación de las variables y parámetros fijos que intervienen en el mismo, se procedió a realizar el diseño de múltiples prototipos distintos que respondían al requerimiento, dos de ellos son presentados a continuación con el ánimo de ilustrar este trabajo investigativo.

Los principales criterios de diseño contemplados en su desarrollo fueron:

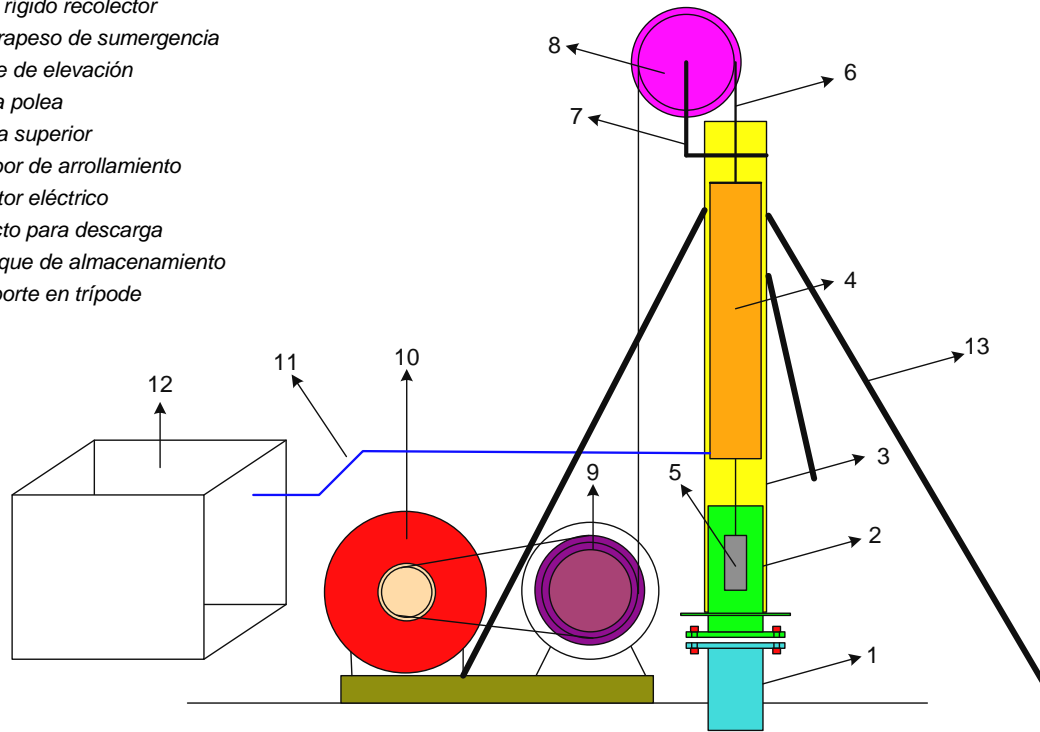
- Mínimo número de elementos involucrados en la operación.
- Mínimas dimensiones de montaje (diseño compacto).
- Pocos componentes funcionales que generan bajos costos de producción.

2.2.1.1 Modelo de prueba 1.

Este proyecto inicial se enfocó en un diseño de mínimos componentes, así como dimensiones y espacios, para obtener una propuesta sencilla y compacta que funcionara de manera simple y efectiva a la hora de llevar a cabo la extracción de hidrocarburo, además fue concebida bajo criterios específicos de mínimo consumo energético, representado en una configuración que hace uso de fuerzas naturales para realizar acciones y movimientos necesarios para el proceso; así como en lo que a la seguridad en el manejo y disposición de la sustancia de trabajo se refiere. Su vista esquemática se muestra a continuación.

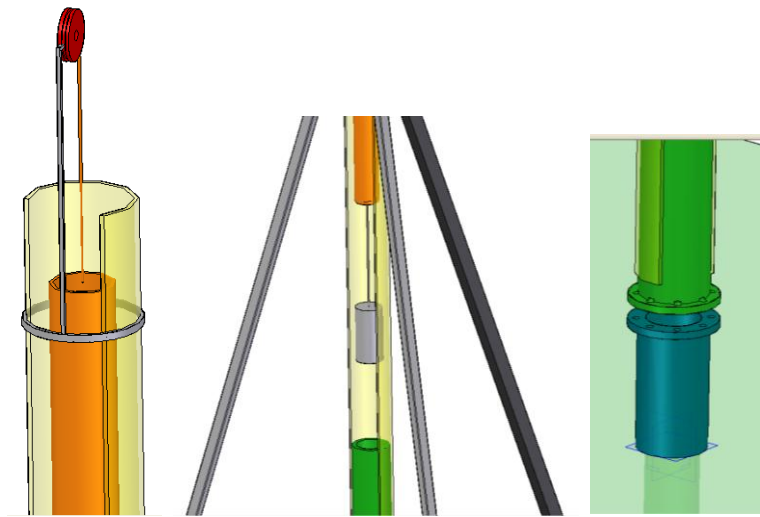
Figura 4. Esquema de los componentes principales de la primera propuesta

- 1-cilindro base bridado
- 2-cilindro soporte bridado
- 3-cilindro guía
- 4-tubo rígido recolector
- 5-contrapeso de sumergencia
- 6-cable de elevación
- 7-porta polea
- 8-polea superior
- 9-tambor de arrollamiento
- 10-motor eléctrico
- 11-ducto para descarga
- 12-tanque de almacenamiento
- 13-soporte en trípode



De igual manera como se hizo con todos y cada uno de los esquemas propuestos, una vez se ha llevado a cabo su diseño plano, se procede a elaborar su estructura y montaje con la ayuda de un software llamado SOLID WORK (licencia Académica). En esta etapa del proceso y con el apoyo de esta fuerte herramienta tipo CAD (computer assisted design), se logra formalizar y consolidar la idea en tres dimensiones, así como identificar posibles problemas de concordancia entre piezas y componentes, requerimientos extras de conexión, interferencias entre elementos en movimiento, etc.; los cuales no fueron considerados en un principio. De forma siguiente se muestran algunas imágenes representativas de dicho conjunto.

Figura 5. Modelamiento en computador del primer prototipo



Por último y para finalizar la consolidación de cada prospecto validado con antelación, se realiza la construcción física a escala de dicho modelo, permitiendo asegurar un análisis lo más cercano y detallado posible a lo que sería el comportamiento del sistema real, una vez este entra en funcionamiento.

Figura 6. Modelo físico del prototipo inicial



Para este caso en particular se consiguen diagnosticar toda una serie de ventajas y cualidades del equipo, frente a la tarea de extracción; pero de igual modo se notan mínimas situaciones no aceptables que hacen descartar inmediatamente la propuesta; pues como se mencionó desde un principio, el desarrollo del sistema apunta hacia un concepto muy preciso y efectivo.

Se mostrarán a continuación algunas de las más destacadas características que presentó este modelo, ya que representan una referencia a seguir en el trabajo de una siguiente propuesta; a su vez se mencionarán las razones por las cuales se rechazó, siendo ellas el punto de partida para mejorar en adelante. Dentro de los aspectos favorables que mostró el prototipo se encuentran las siguientes:

- El sistema es muy compacto, permitiendo montar todos los elementos constitutivos del mismo dentro de un radio base muy pequeño.
- Ahorro energético en la tarea de conducción y almacenamiento del hidrocarburo recuperado, como consecuencia de la descarga directa desde un nivel de mayor potencial de elevación, hacia un tanque único de almacenamiento.
- Poco volumen y peso del equipo, como consecuencia de la simplicidad en componentes y baja densidad en los materiales de los mismos.
- Niveles óptimos de seguridad, respecto al manejo que se hace para llevar a cabo el descarte de gas propio del yacimiento; el cual se realiza casi inmediatamente este llega a la parte superior del tubo guía, evitando así que dicho gas deba viajar de manera conjunta al hidrocarburo, a través de todo el sistema hasta el final del mismo, pasando a lo largo de elementos mecánicos

- y partes en movimiento que pueden llegar a generar situaciones potencialmente peligrosas, tales como ignición o explosión debido a cargas electrostáticas en componentes en movimiento o por fricción de los mismos.
- Diseño versátil del elemento de contrapeso para sumergencia; mediante la adaptación de un perfil (geometría) de ataque más hidrodinámico que le permite ingresar con menor resistencia dentro de la zona fluida. Así como adoptar diversos valores de peso en su montaje, de acuerdo a los niveles de densidad del crudo en donde este ingresa.
 - Facilidad en la manufactura del elemento recolector el cual al ser geoméricamente concordante con el tubo guía, puede ser elaborado con un objeto cilíndrico más resistente y rígido, que aguante eficazmente las pesadas condiciones durante su ascenso y descenso por la tubería de producción del pozo.
 - Disminución de la potencia eléctrica (consumo) que se requiere para poner en rotación elementos tales como el carretel de arrollamiento y el conjunto de poleas, así como la disminución en el tiro sobre el elemento de recolección. Esto a causa de la manufactura de los componentes mismos, con materiales que ofrezcan las mismas propiedades mecánicas, pero de menores valores de densidad que los harán más livianos y así se disminuirán inercias rotacionales y cargas innecesarias. Para nombrar algunos se tiene el nylon como material para el cable de tiro, el pvc para el elemento recolector, plástico para el carretel de arrollamiento y poleas, así como aluminio para elementos de soporte y guía.
 - Eficiente acople directo entre el motor eléctrico y el tambor de arrollamiento (por medio de banda en V) eliminando la presencia de elementos reductores, que aumentan los tiempos de cada ciclo, e incurren en costos extras de producción.

- De acuerdo con los pocos elementos requeridos para conformar el prototipo y haciendo un análisis de los materiales necesarios para su elaboración, se tiene una perspectiva positiva en relación a los bajos costos en los que se incurriría para llevar a cabo el desarrollo formal del equipo listo para empezar a operar.

Considerando el anterior panorama es claro que la creación de un sistema para llevar a cabo la extracción de hidrocarburo remanente, es potencialmente efectiva, y que su grado de rendimiento depende de la exigencia que en su diseño se demande; por ello es que las siguientes situaciones mencionadas hicieron descartar la anterior propuesta y encaminarnos en una nueva, que guardara las ventajas de esta última, pero que solucionara los inconvenientes referidos a continuación.

- Baja mantenibilidad del elemento de direccionamiento (polea) superior a causa de su altura (11m.)
- Montaje de elementos de soporte complejos para el tubo guía, con el ánimo de otorgar buena estabilidad al sistema así como permitir acceso a su punto más alto.
- Alto riesgo de accidente por parte de quien realice actividades en la parte más alta del equipo.
- Difícil manejo de una situación de emergencia por tener una esbelta configuración primordialmente vertical.
- Se requiere de un mecanismo mecánico (debido a que la presencia de gas no permite dispositivos que manejen cargas eléctricas cercanos a la boca del

pozo) muy complejo para llevar a cabo la evacuación del hidrocarburo recuperado en el elemento recolector una vez este se encuentra por encima del nivel del suelo.

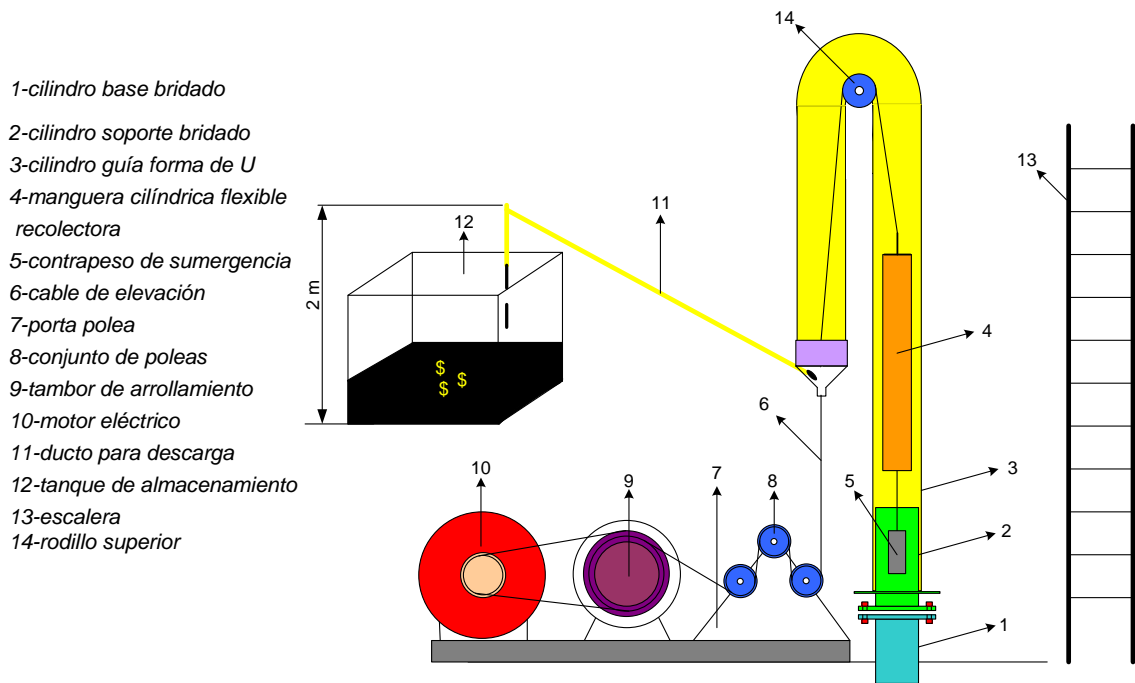
2.2.1.2 Modelo de prueba 2.

De igual forma como se procedió en cada uno de los esquemas propuestos, se siguió un proceso similar para desarrollar este otro diseño, que se mostrará para documentar aún más la actividad investigativa, y presentar la evolución del trabajo que más tarde permitiría consolidar un modelo final.

Así fue como en este siguiente paso hacia un sistema preciso y efectivo, se comenzó por solucionar los inconvenientes que ya se habían referenciado en el trabajo anterior y mantener las ventajas que ya se tenían; se desarrollo entonces el esquema de componentes principales de este nuevo prototipo, como también la configuración de los mismos.

Se puede notar como la disposición de elementos en esta nueva propuesta; más específicamente la forma en U del tubo guía y el conjunto de rodillos de apoyo y direccionamiento de la misma zona (figura 7- componente #3), dan solución a la etapa de descarga del hidrocarburo recuperado en el elemento recolector, que se presentaba como un problema en el diseño mostrado anteriormente; esto debido a la posibilidad de curvamiento, lo cual permite aprovechar la acción de la gravedad para producir el desalojo del fluido extraído y su consecuente conducción directa por diferencia de elevación desde un punto de mayor altura hacia otro de menor en donde se ubica el tanque de almacenamiento.

Figura 7. Esquema de los componentes principales de la segunda propuesta



Si bien de esta manera se logro completar de manera continua las cuatro etapas (descenso, recuperación, ascenso y descarga) necesarias para llevar a cabo la labor de extracción; aún permanecían las inquietudes en lo concerniente a las dificultades que se experimentaban como consecuencia de la gran altura requerida por el sistema.

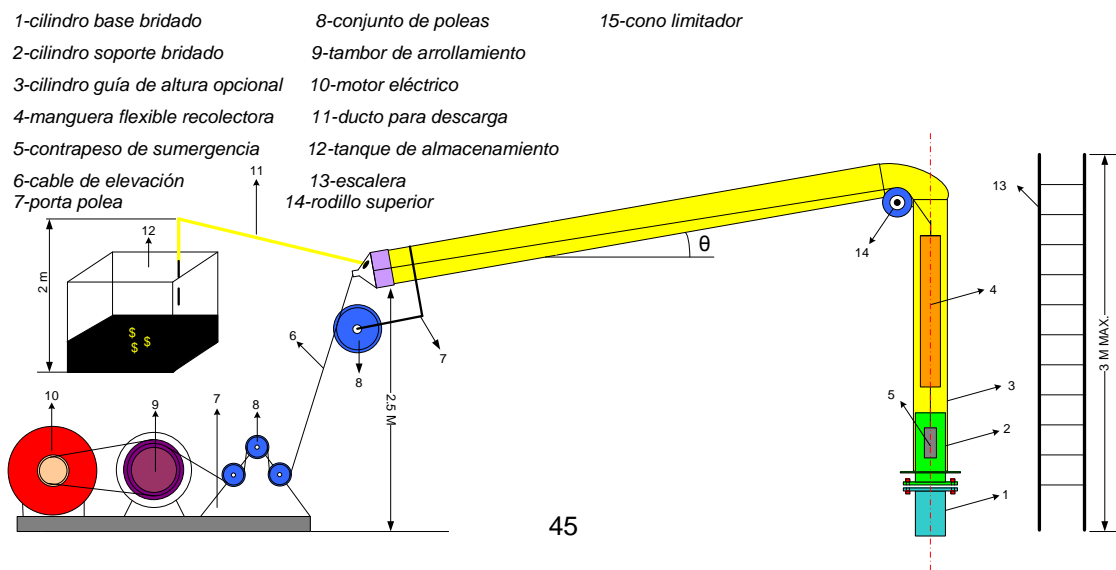
Además de lo ya expuesto, este nuevo modelo permitía inferir otro problema relacionado con grandes fuerzas y momentos sobre la alta estructura como respuesta a cargas dinámicas generadas por el desplazamiento periódico y alternativo de un elemento de gran longitud lleno de fluido (elemento recolector).

Sin necesidad de realizar un análisis exhaustivo de los sistemas elaborados, se logro identificar la *altura* en la disposición de elementos constitutivos como la variable responsable de todos los inconvenientes que permanecían presentes en cada uno de los prototipos desarrollados; hecho que permitió modificar inmediatamente la concepción de diseño y comenzar de nuevo con una propuesta que guardara todas las ventajas conseguidas y adoptara los cambios. Consiguiéndose así el desarrollo del prototipo final.

2.3 CONFIGURACIÓN ÓPTIMA

Como ha sido mostrado anteriormente la búsqueda de una solución que atienda el proceso de extracción de hidrocarburo remanente en pozos abandonados o de baja producción, con el ánimo de extender las reservas existentes y contribuir de esta manera a colaborar en el suministro del mismo ante la creciente demanda que de este recurso hace el planeta; ha motivado un trabajo investigativo arduo que ha llevado después de algún tiempo de trabajo, a permitir presentar una posible alternativa que responde de manera efectiva a los requerimientos exigidos.

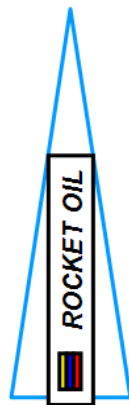
Figura 8. Esquema y disposición plana de los componentes principales del prototipo apropiado



Es así que nace la idea del sistema ROCKET OIL, cuyo nombre obedece a la similitud en la función de elevación que presenta dicho equipo con los vehículos de transporte al espacio en los cuales se busca llevar una preciada carga humana desde la superficie terrestre hasta puntos muy alejados de la misma, con el ánimo de crecer como civilización y expandir nuestro desarrollo.

De igual forma este prototipo provoca el ascenso de un recurso natural muy valioso si bien no tanto como el hombre, si muy importante para contribuir en su progreso, puesta en marcha de su industria, fuente de energía para sus sistemas y generador de riqueza e incremento de calidad de vida para todos aquellos que cuentan con la fortuna de disponer de este recurso bajo su suelo. Además de lo ya expuesto, se quiere otorgar al sistema con este nombre una identidad que permita identificarlo como dueño único de su tecnología y carácter innovador en materia del principio de funcionamiento sobre el cual éste está basado.

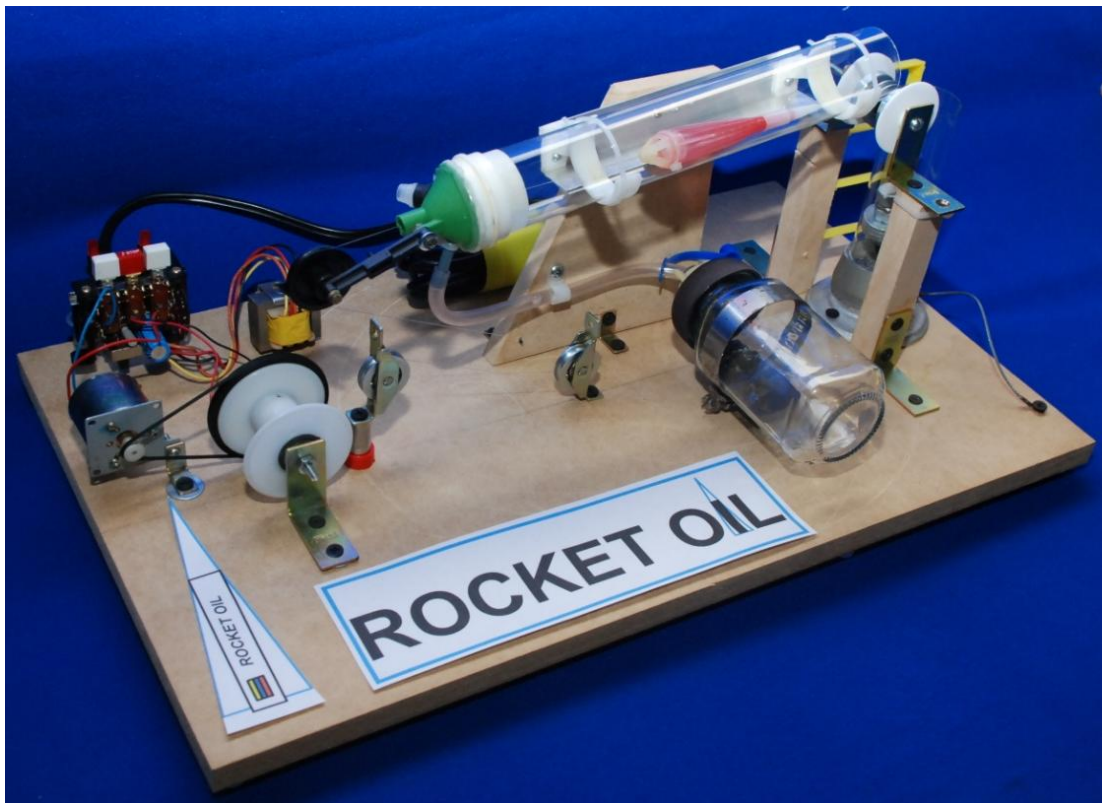
Figura 9. Nombre y símbolo del sistema prototipo



2.3.1 Construcción del modelo físico a escala.

Con el ánimo de probar la funcionalidad de esta propuesta, se llevó a cabo la construcción a escala del modelo físico de esta última, permitiendo así observar claramente el comportamiento que seguían sus componentes, la relación entre ellos y el cumplimiento de sus objetivos; hecho que consolida al sistema desarrollado como óptimo y viable en razón a su operación efectiva y resultados satisfactorios.

Figura 10. Modelo físico a escala del sistema prototipo



Fuente: Autores

3. DISEÑO DEL SISTEMA

Como ha sido mostrado anteriormente, el sistema propuesto consiste en un equipo para llevar a cabo la elevación hasta un par de metros por encima de la superficie del suelo, de una carga productiva recuperada a un nivel de profundidad determinado, máximo de 1000 metros (3280 pies). Llevados a cabo los estudios correspondientes a los procesos relacionados con la producción petrolera, y realizada la visita al campo Colorado ubicado en el departamento de Santander vía a Barrancabermeja, se pudo pensar en el concepto de diseño que sería aplicado en la operación de extracción de crudo remanente, así como la determinación de las variables y los parámetros fijos a los cuales deberían ser adaptados los elementos incorporados.

De esta manera se establecieron los siguientes criterios para implementar en el desarrollo del prototipo:

- El sistema empleará como elemento de tracción un cable metálico apropiado para las condiciones de carga y esfuerzo.
- El sistema tendrá los elementos de seguridad apropiados para el manejo del gas proveniente del pozo, así como los mecanismos y controles adecuados para garantizar una operación segura.
- El sistema deberá ser sencillo, y compacto.
- El sistema hará uso de la fuerza de gravedad para llevar a cabo la conducción de crudo recuperado hacia el tanque de almacenamiento.
- El sistema incorporará un componente motriz por transmisión flexible (bandas).

- El sistema tendrá un elemento de recolección flexible, geoméricamente adecuado a la configuración interna del pozo y resistente a las condiciones de trabajo.
- El sistema operará mediante un motor eléctrico adecuado para el medio de trabajo, y será calculado para que su consumo sea bajo, haciendo el equipo económico, rentable y altamente eficiente.

3.1 COMPONENTES A IMPLEMENTAR

A continuación se mostrarán esquematizados y listados respectivamente los componentes principales a ser implementados en el sistema para la reactivación de pozos de hidrocarburo, marginales, abandonados o de baja presión.

Figura 11. Esquema de componentes 1

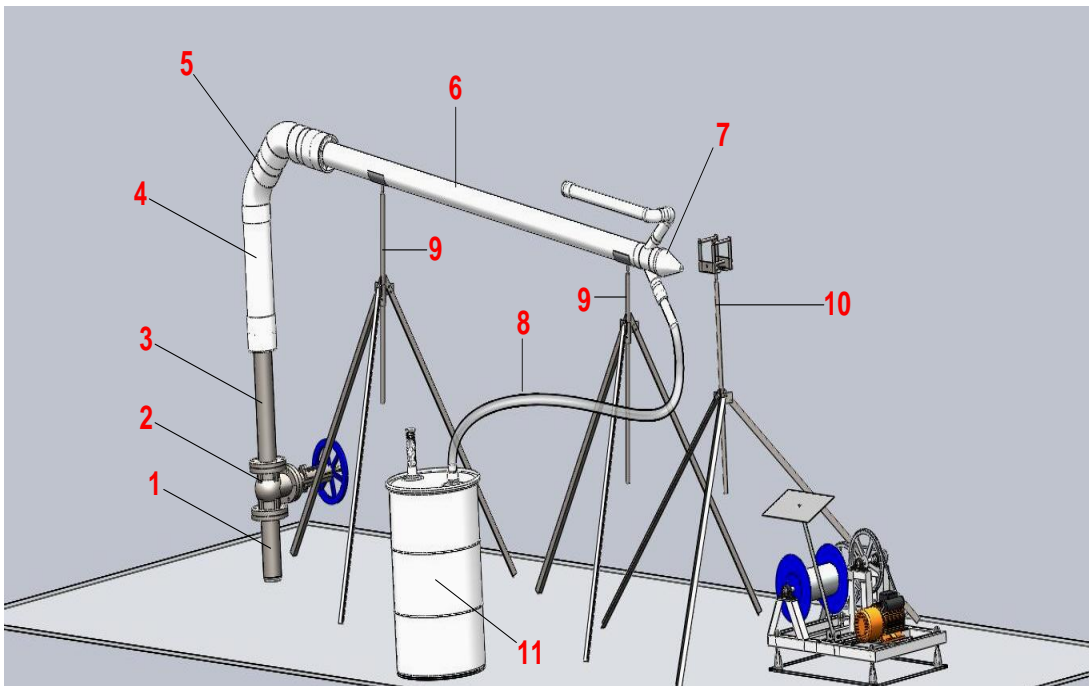


Figura 12. Esquema de componentes 2

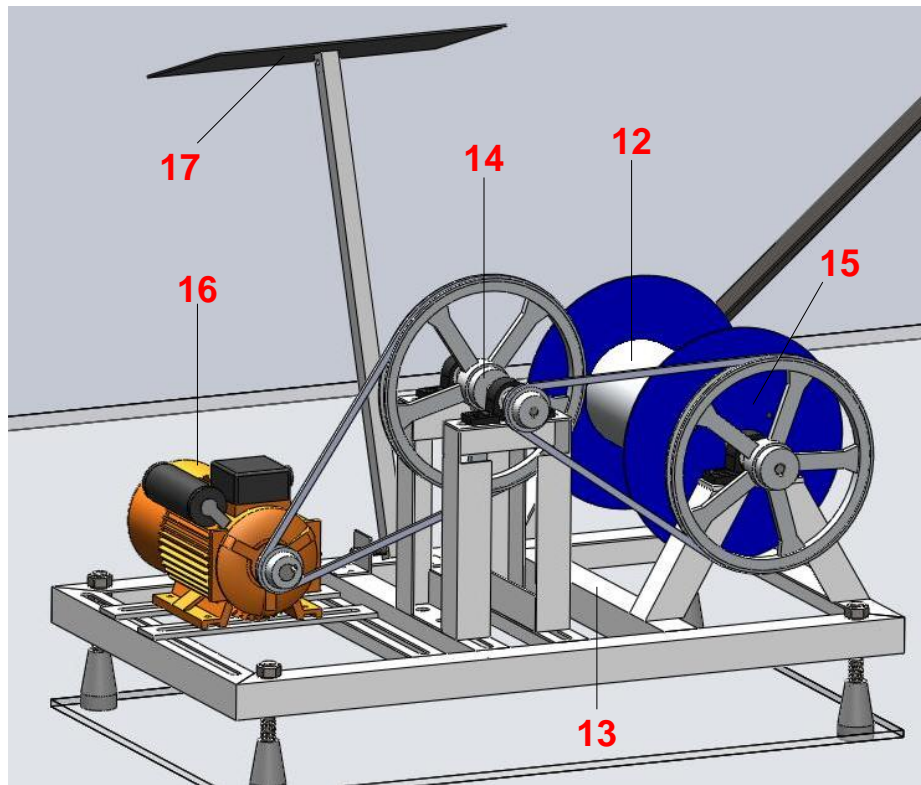


Figura 13. Esquema de componentes 3

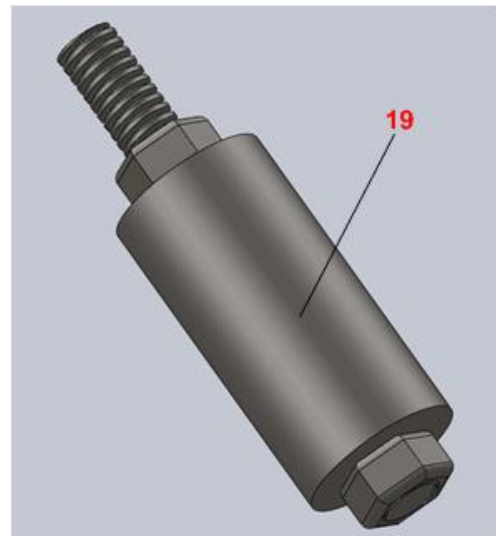
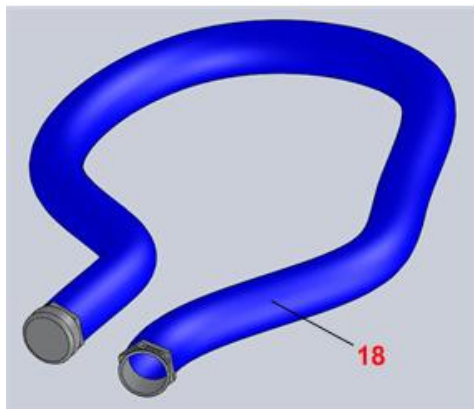


Tabla 1. Listado de componentes principales implementados en el sistema

# DE ELEMENTO	COMPONENTE
1	CILINDRO BASE BRIDADO
2	VÁLVULA DE SEGURIDAD EN BOCA DE POZO
3	CILINDRO SOPORTE BRIDADO
4	CILINDRO GUÍA VERTICAL
5	CABEZAL DE DIRECCIONAMIENTO
6	CILINDRO DE DESCARGA
7	CONO DE RETENCIÓN
8	MANGUERA DE CONDUCCIÓN A TANQUE
9	SOPORTES DEL CILINDRO DE DESCARGA
10	SOPORTE PARA POLEA DE APOYO SUPERIOR
11	TANQUE DE ALMACENAMIENTO
12	CABLE DE ELEVACIÓN
13	MARCO BASE DEL COMPONENTE MOTRIZ
14	TRANSMISIÓN FLEXIBLE
15	TAMBOR DE ARROLLAMIENTO
16	MOTOR ELÉCTRICO DE 1 HP.
17	TABLERO DE CONTROL
18	COLECTOR DE RECUPERACIÓN
19	CONTRAPESO DE SUMERGENCIA

3.1.1 Diseño de partes y elementos constitutivos.

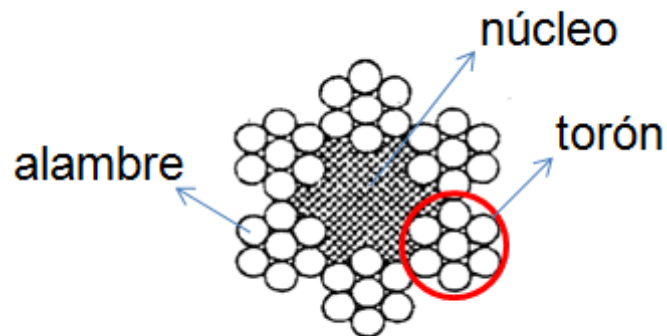
Una vez establecidos los componentes básicos del sistema, se procede con su correspondiente fase de diseño, en la cual se establecen las geometrías, materiales, estado de esfuerzos (haciendo uso de la herramienta computacional) y dimensiones generales que deben tener los cuerpos involucrados en la operación del sistema. De igual forma se hace una descripción de los mismos así como una explicación de su labor a desempeñar como miembros constitutivos de un todo.

3.1.1.1 Cable de elevación

El continuo ascenso y descenso de la manguera colectora a lo largo de la tubería de producción, no sería posible sin un elemento que transmitiera el tiro del motor eléctrico a la distancia. Se investigaron diferentes tipos de materiales para llevar a cabo esta tarea, pues cabe notar que es responsabilidad de este elemento el rescate y la sujeción desde las profundas capas terrestres del elemento recolector.

Como es bien sabido los cables metálicos son de amplio uso en aplicaciones en las cuales la potencia se debe transmitir sobre grandes distancias centrales, tales como malacates, elevadores o teleféricos. Por lo general su configuración la constituye un núcleo fibroso de carácter vegetal (cáñamo) o sintético (polipropileno); sus propósitos son lubricar y de esta forma prevenir el desgaste excesivo del cable así como soportar elásticamente los torones.

Figura 14. Sección transversal típica de un cable de acero.

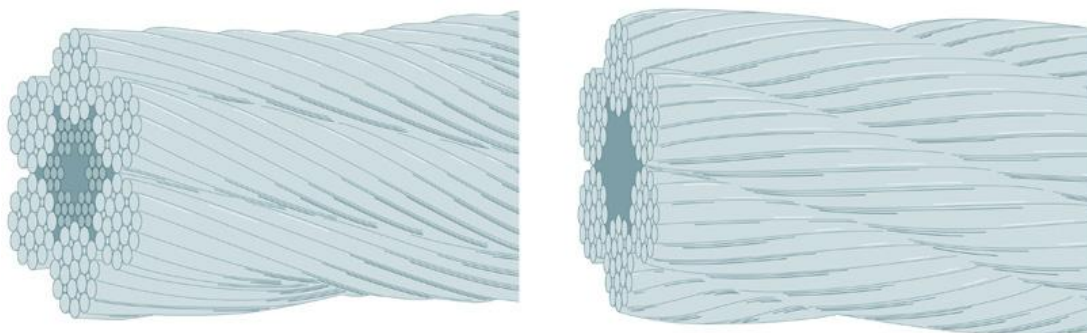


Sección transversal de un cable metálico 6x7

Fuente: HAMROCK, Design of Machine Elements

Los torones consisten en agrupamientos de alambres colocados alrededor del núcleo, y de acuerdo a su arreglo permiten observar dos configuraciones clásicas que se presentan a continuación, junto con sus ventajas y desventajas.

Figura 15. Configuraciones comunes de cables metálicos



Configuración tipo LANG

Configuración tipo ESTÁNDAR o REGULAR

Fuente: HAMROCK, Design of Machine Elements

Configuración tipo Lang

Esta configuración tiene los alambres en los torones y los torones en el cable torcidos en la misma dirección.

Sus principales características son las siguientes:

- Tiene mayor resistencia al desgaste abrasivo y a la fatiga por flexión que la configuración regular.
- Son más susceptibles a abusos en su manejo, tales como pellizcamiento y aplastamiento cuando se arrollan inapropiadamente sobre tambores.
- El momento de torsión que actúa en los torones tiende a desenrollar el torón causando el desenvolvimiento del cable.
- Sus extremos deben ser cuidadosamente asegurados para prevenir la desconfiguración del cable.

Configuración tipo estándar o regular

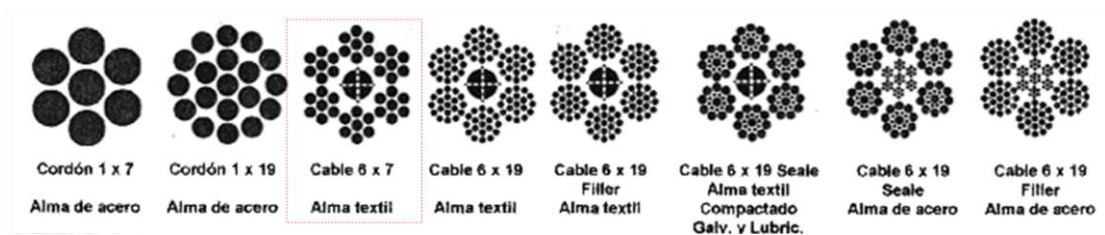
Esta configuración tiene el alambre torcido en una dirección para formar los torones y éstos se tuercen en la dirección opuesta para formar el cable. Sus alambres visibles se encuentran casi paralelos al eje del cable.

Su principal característica es la siguiente:

- Su ventaja más importante es que el cable no se dobla o se destuerce, y es fácil de manejar.

Luego de considerar varias alternativas relacionadas a origen y forma, se decidió optar por un tipo de cable acerado de sección transversal 6x7 (tipo más apropiado para arrastre e izamiento) y configuración estándar o regular calculada en base a los valores de carga dinámica que este soporta y que ofrezca unos considerables niveles de resistencia mecánica, así como poca densidad lineal que se traduce en disminución en la carga demandada al sistema motriz, lo que a su vez representa un bajo costo de funcionamiento.

Figura 16. Sección transversal seleccionada (6x7)



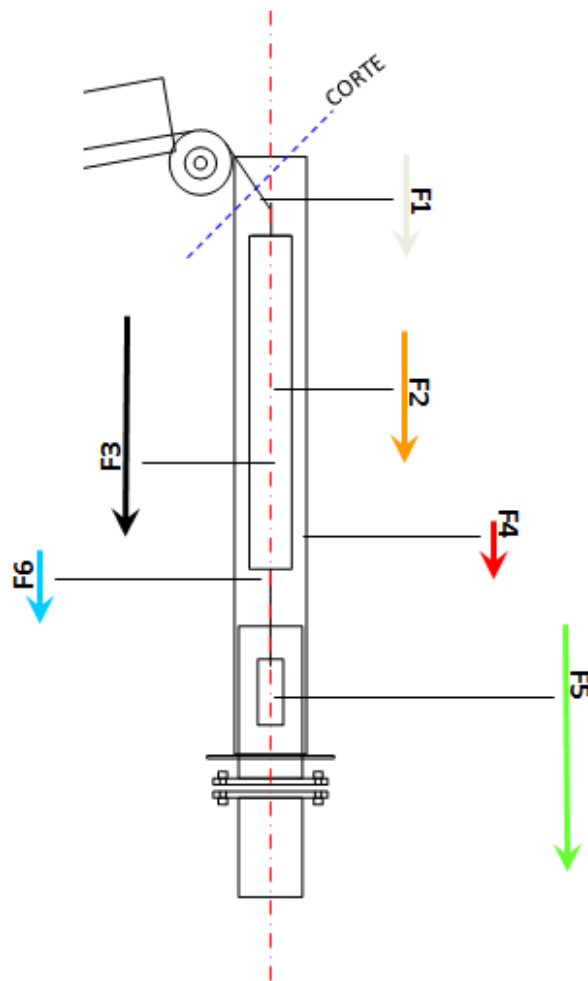
Fuente: HAMROCK, Design of Machine Elements

Teniendo claro el material en el cual estaría fabricado el cable y el tipo de sección transversal se procede a tener en cuenta los diferentes factores de operación y sus respectivos valores de carga a la cual se encuentra sometido

dicho elemento, que estarán a su vez relacionados con la capacidad de recuperación que tiene el equipo, así como con su capacidad de desempeño y eficiencia.

De esta manera se pudieron determinar las siguientes cargas para el cable de elevación:

Figura 17. Fuerzas sobre el cable de levantamiento



Donde:

F1 Representa el peso propio del cable de levantamiento (1000 metros).

F2 Representa el peso del elemento colector vacío.

F3 Representa el peso del volumen de hidrocarburo extraído.

F4 Representa las fuerzas de fricción entre el contorno interior de la tubería de producción y el elemento colector.

F5 Representa el peso del contrapeso de sumergencia.

F6 Representa la fuerza por aceleración del elemento colector.

Sus valores numéricos son calculados a continuación.

Peso del cable de levantamiento

Este valor se determinó en el laboratorio de caracterización de materiales así como fueron halladas las demás propiedades mecánicas y físicas asociadas a la configuración seleccionada de una muestra de posibles opciones de cable que se mostrarán más adelante.

El procedimiento consistió en cortar una longitud estándar de 1 cm. y tomar su correspondiente peso en una balanza de precisión; para de esta forma multiplicar el valor obtenido para un centímetro por la cantidad de centímetros en 1000 metros de longitud.

Figura 18. Balanza de precisión para la determinación de la carga asociada al peso propio del cable



Fuente: autores

$$1000m = 100000 \text{ cm}$$

$$\frac{0.0001kg}{cm} \times 100000 \text{ cm} = \mathbf{10 \text{ KGf}}$$

Peso del elemento colector vacío

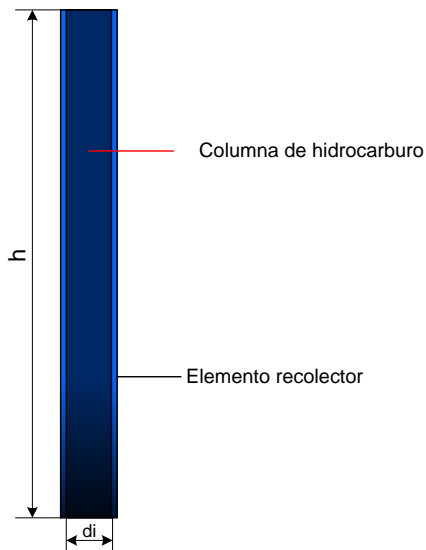
El peso de este elemento se determinó directamente mediante balanza convencional, y su valor fue de: **1.5 KGf**.

Los parámetros de diseño correspondiente a este componente se encuentran en el numeral 3.1.1.11.

Peso del volumen de hidrocarburo extraído

Este valor se determinó en base a la proyección técnica que se hizo del equipo desde un comienzo, en la cual sería recuperada una columna de crudo de 3 metros por cada viaje que el elemento recolector haría al interior del pozo. Por lo tanto contando con un área transversal fija dependiente del diámetro interno del recolector, una altura de fluido conocida y una densidad promedio del hidrocarburo recuperado, se obtuvo dicha carga como se muestra en el siguiente esquema.

Figura 19. Columna de crudo recuperado



El cálculo es el siguiente:

$$h \text{ columna} = 3 \text{ m}$$

$$di = 0.054 \text{ m}$$

$$\rho \text{ crudo} \approx 900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$Vol\ columna = \frac{\pi di^2}{4} \times h = \frac{\pi * 0.054^2}{4} \times 3 = 6.87 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$Carga = Vol\ columna \times \rho\ crudo = (6.87 \times 10^{-3}) \times 900 = \mathbf{6.18\ KGf}$$

Fuerzas de fricción

Estas son el resultado del contacto que se da entre el elemento recolector y el contorno interno de la tubería de producción o casing a través de la cual este viaja; para realizar su cálculo se tomo un valor de coeficiente de fricción por rozamiento dinámico (μ_d) entre un material metálico y uno sintético de 0.7, y se procedió a elaborar el diagrama de fuerzas correspondiente a esta situación.

De esta manera tenemos que:

$$F\ fricción = \mu \times N$$

Donde

$$N \approx mg\ sen5^\circ$$

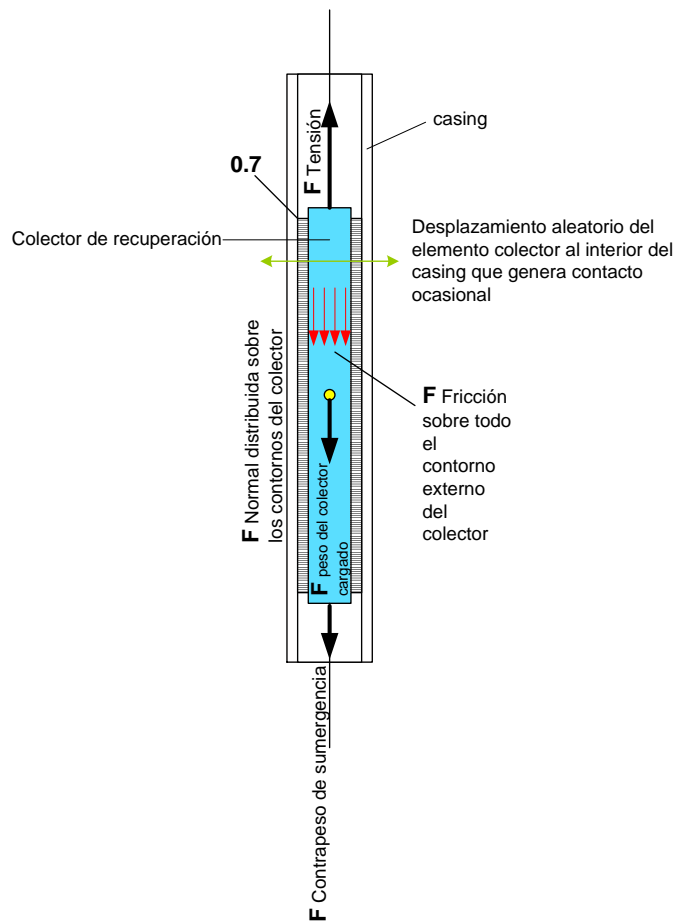
Cabe aclarar que 5° es un ángulo relativo, que se toma para poder obtener un valor de fuerza normal distribuida sobre el contorno exterior del elemento colector; pues teóricamente la línea axial del colector al ser paralela a la línea de centro del casing no generarían fuerza de contacto, sin embargo en la práctica esto ocurre como consecuencia de los desplazamientos laterales aleatorios que presenta el colector durante su ascenso y descenso.

$$N \approx 30 \text{ sen}5^\circ = 2.61 \text{ KGf}$$

$$F_{\text{fricción}} = 0.7 \times 2.61 = 1.82 \text{ KGf}$$

Sin embargo tomamos un valor conservativo de $F_{\text{fricción}} = 2.5 \text{ kgf}$, pensando en las variables condiciones producto de las irregularidades en la superficie del casing así como la presencia de lodos, parafinas u otros depósitos que afecten la relación de contacto entre los elementos en cuestión.

Figura 20. Diagrama de fuerzas sobre el elemento recolector



Peso del contrapeso de sumergencia

En esta etapa de determinación de la carga de trabajo a la cual se verá sometido el cable de elevación nos interesa conocer los valores numéricos de las fuerzas sobre el mismo; por tal razón en este momento solo se establecerá el valor de carga que induce este elemento sin presentar las razones del porque de la misma.

$$F_{\text{contrapeso}} = 6 \text{ KGf}$$

Los parámetros de diseño de este componente se encuentran claramente explicados en el numeral 3.1.1.12

Fuerza de aceleración

El valor de esta fuerza es obtenido del análisis dinámico llevado a cabo en la sección 4.4 del capítulo número 4.

$$F_{\text{aceleración}} = 3.5 \text{ KGf}$$

Tomando los resultados obtenidos anteriormente podemos determinar la fuerza neta a la cual se verá sometido el cable de elevación

$$F_{\text{cable}} = F1 + F2 + F3 + F4 + F5 + F6 = 10 + 1.5 + 6.18 + 2.5 + 6 + 3.5$$

$$F_{\text{cable}} = 29.68 \text{ KGf}$$

Con este valor ya definido se procede a llevar a cabo la selección de un cable apropiado para esta condición de carga; para ello se evalúan en laboratorio 3 muestras comerciales de dicho elemento, correspondientes a los diámetros de 3/16", 1/8", y 1/16"; con el ánimo de obtener una caracterización completa y precisa de cada uno, ya que al ser el responsable de descender, sujetar y elevar la carga productiva tiene un alto nivel de criticidad así como los demás componentes que ingresan al pozo.

Figura 21. Muestras de cables analizadas en el laboratorio



Fuente: autores

Figura 22. Determinación en el laboratorio de las propiedades mecánicas de las muestras de cables



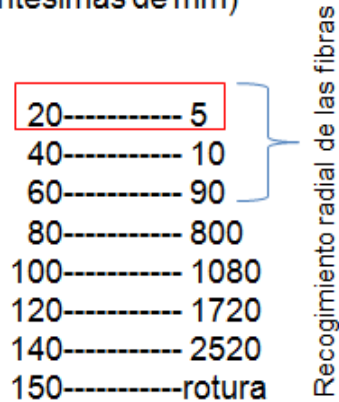
Fuente: autores

Deformación del cable bajo carga

Principalmente el deslizamiento de los alambres que constituyen la entrelazada configuración del cable provoca una deformación de este último bajo carga. De acuerdo a las pruebas realizadas en laboratorio los valores de desplazamiento lineal de la muestra a implementar son los mostrados en la siguiente figura.

Figura 23. Deformación del cable a implementar bajo estado de carga

Carga (kg.f) vs. Deformación
(centésimas de mm)



El valor de deformación teórico es el siguiente:

$$\delta = \frac{Ft \times L}{Am \times Ecable} = \frac{56 \times 3280.8}{0.001484375 \times 14E^6} = 10.26 \text{ in.} \approx 26 \text{ cm.}$$

El cual coincide con los resultados obtenidos experimentalmente.

Las propiedades mecánicas correspondientes a la configuración del cable seleccionado para la aplicación son las siguientes:

Tabla 2. Caracterización del cable a implementar

- material: acero galvanizado
- Configuración : tipo estándar derecha
- diámetro nominal: 1/16" = 0.0625 in= 1.588 mm

- área de la sección transversal metálica resistente:
 $0.9582 \text{ mm}^2 = 0.001484375 \text{ in}^2$
- carga de fluencia (*laboratorio*): 130 kg.f
- carga de rotura (*laboratorio*): 150 kg.f
- S_u (*laboratorio*) = $222.315 \text{ E}^3 \text{ psi}$
- densidad lineal: 0.01kg/m
- carga de aplastamiento: 792 psi
- # de torones: 6
- # de alambres por torón: 7
- E (modulo de elasticidad): $14 \text{ E}^6 \text{ psi}$
- diámetro del torón: 0.5 mm
- diámetro de alambre: 0.16 mm
- # total de alambres: 42
- otros materiales presentes en la configuración del cable: 8 fibras sintéticas entrelazadas de 0.07 mm de diámetro
- tolerancia a la corrosión: media

Proceso de diseño

La metodología de diseño utilizada para este componente es la presentada por Bernard J. Hamrock en su libro *Diseño de Elementos de Máquinas* (Mac.Graw Hill). En este se plantean como criterios principales a la hora de calcular un cable, los siguientes:

- Esfuerzo de tensión
- Esfuerzo flexionante
- Presión de aplastamiento
- Fatiga

Para cada uno de ellos se debe calcular su factor de seguridad correspondiente, el cual debe estar dentro del intervalo aceptado para cada caso; así se garantiza un diseño confiable.

Esfuerzo de tensión

La fuerza total que actúa en el cable es:

$$F_t = F_w + F_r + F_a$$

Donde:

F_w = peso muerto que soporta el cable (N)

F_r = peso del cable (N)

F_a = fuerza debida a la aceleración (N)

$$Fw = (2.5 \times 2.2) + (6.18 \times 2.2) + (5 \times 2.2) = 30.1 \text{ lb} - f$$

$$Fr = (10 \times 2.2) = 22 \text{ lb} - f$$

$$Fa = 13.2 \text{ lb} - f$$

De modo que:

$$Ft = 30.1 + 22 + 13.2 = \mathbf{65.5 \text{ lb} - f} \approx \mathbf{29.68 \text{ KG} - f}$$

El esfuerzo de tensión será entonces:

$$\sigma_t = \frac{Ft}{Am}$$

$$Am = 0.38d^2$$

Donde

Am = área de la sección transversal metálica resistente para cables de izar o arrastre.

d = diámetro nominal del cable

$$Am = 0.38 \times (0.0625)^2 = 0.001484375 \text{ in}^2$$

$$\sigma_t = \frac{65.5}{0.001484375} = 43789 \text{ psi}$$

El valor del esfuerzo permisible se obtiene mediante previa caracterización del cable hecha en el laboratorio y depende del material en el cual se encuentra manufacturado este último (ver tabla 2).

El factor de seguridad será entonces:

$$Ns = \frac{\sigma_{perm}}{\sigma_t} = \frac{222315}{43789} = \mathbf{5.07}$$

El cual es un valor aceptable para una aplicación de tiro, izamiento o levantamiento de carga como se puede ver respecto a la siguiente tabla.

Tabla 3. Factores de seguridad mínimos para cables metálicos

Cables de vía	3.2	Ascensores, pie/min	
Cables de retenida	3.5	50	7.60
Para pozos de mina, pies:		300	9.20
Hasta 500	8.0	800	11.25
1 000 - 2 000	7.0	1200	11.80
2 000 - 3 000	6.0	1500	11.90
Más de 3 000	5.0	Montacargas industriales, pie/min	
De elevación o izaje	5.0	50	6.65
De arrastre	6.0	300	8.20
Grúas y cabrias	6.0	800	10.00
Montacargas eléctricos	7.0	1200	10.50
Elevadores manuales	5.0	1500	10.55
Ascensores privados	7.5	Montaplatos de potencia pie/min	
Montaplatos manuales	4.5	50	4.8
Silos de granos	7.5	300	6.6
		500	8.0

* El uso de estos factores no impide una falla por fatiga

Fuente: recopilado de varias fuentes, incluyendo la norma ANSI A17.1 - 1978.

Fuente: HAMROCK, Design of Machine Elements

Esfuerzo flexionante

De acuerdo a las ecuaciones que maneja la resistencia de materiales, el momento flexionante de los alambres en un cable que pasa sobre una polea es:

$$M = \frac{EI}{r}$$

Y

$$M = \frac{\sigma I}{c}$$

Donde

E = modulo de elasticidad del alambre, Pa

Al igualar las dos ecuaciones y resolver el esfuerzo flexionante, se tiene que:

$$\sigma b = \frac{Ec}{r}$$

Donde

r = radio de curvatura al que se someterá el cable, m

c = distancia desde el eje neutro hasta la fibra externa del alambre, m

El radio de curvatura al que se someterá el cable es similar al radio del la polea $D/2$ y c similar a $dw/2$.

Por tanto:

$$\sigma b = \frac{Edw}{D}$$

Donde

dw = diámetro del alambre, m

D = diámetro de la polea, m

Se debe tener en cuenta que entre mayor sea la razón D/dw , menor será el esfuerzo flexionante.

Los diámetros mínimos que se sugieren en la tabla 4, se basan en una razón D/d_w de 400. De ser posible las poleas se diseñarán con una razón mayor; si la razón D/d_w es menor que 200, con frecuencia las cargas pesadas causarán una deformación permanente en el cable.

Tabla 4. Diámetros mínimos sugeridos

Cable	Peso lb/pulg	Diámetro mínimo de polea pulg	Tamaños están- dares d , pulg	Material	Tamaño de los alambres exteriores	Módulo de elasticidad* Mpsi	Resistencia kpsi †
6 × 7 arrastré	$1.50d^2$	$42d$	$\frac{1}{4}-1\frac{1}{2}$	Acero monitor	$d/9$	14	100
				Acero de arado	$d/9$	14	88
				Acero suave para arado	$d/9$	14	76
6 × 19, de izaje es- tándar	$1.60d^2$	$26d-34d$	$\frac{1}{4}-2\frac{3}{4}$	Acero monitor	$d/13-d/15$	12	106
				Acero de arado	$d/13-d/16$	12	93
				Acero suave	$d/13-d/16$	12	80
				para arado		11	100
6 × 37, flexible especial	$1.55d^2$	$18d$	$\frac{1}{4}-3\frac{1}{2}$	Acero monitor	$d/22$	11	88
				Acero de arado	$d/22$	10	92
8 × 19, flexible extra	$1.45d^2$	$21d-26d$	$\frac{1}{4}-1\frac{1}{2}$	Acero monitor	$d/15-d/19$	10	80
				Acero de arado	$d/15-d/19$	...	124
7 × 7, de aviación	$1.70d^2$	...	$\frac{1}{16}-\frac{3}{8}$	Acero resistente a la corrosión	...	...	124
				Acero al carbono	...	...	...
7 × 19, de aviación	$1.75d^2$	...	$\frac{1}{8}-\frac{3}{8}$	Acero resistente a la corrosión	...	...	135
				Acero al carbono	...	...	143
De 19 alam- bres, de avia- ción	$2.15d^2$	...	$\frac{1}{32}-\frac{5}{16}$	Acero resistente a la corrosión	...	...	165
				Acero al carbono	...	...	165

* El módulo de elasticidad es aproximado. Resulta afectado por las cargas del cable y, en general, aumenta con la duración del mínimo.

† La resistencia está basada en el área transversal nominal del cable. Las cifras dadas son aproximadas y se basan en tamaños de cable comunes de 1 pulg y de aviación de $\frac{1}{4}$ pulg.

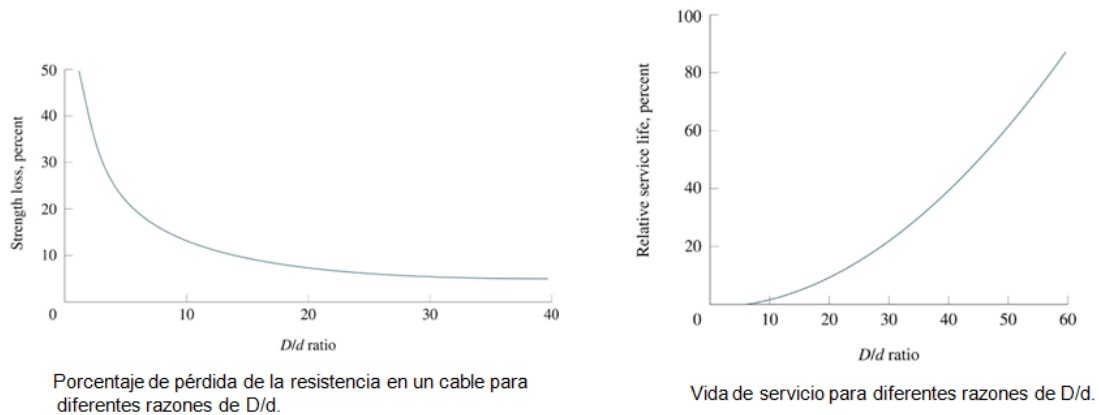
Fuente: recopilada del *American Steel and Wire Company Handbook*.

Fuente: HAMROCK, Design of Machine Elements

De esta forma para un diseño seguro se ha de suponer un $D/dw > 400$ si se desea una larga vida del cable.

A continuación se ilustran las curvas que muestran el decremento en la resistencia y la vida de servicio asociados con diámetros de poleas menores.

Tabla 5. Decremento en resistencia y vida de servicio de cables



Fuente: HAMROCK, Design of Machine Elements

Por tabla 4 se tiene que: $D = 42d$ (cable 6x7)

$$D = 42 (0.0625) = 2.625 \text{ in} = 6.66 \text{ cm.}$$

Este es el diámetro mínimo de polea; el cable no debe pasar por poleas de menor diámetro a este.

$$dw = d/9 = (0.0625/9) = 0.00694 \text{ in} (0.176 \text{ mm})$$

Este es el diámetro teórico de alambre (sugerido por tabla 4)

$$dw = 0.0063 \text{ in} = 0.16 \text{ mm}$$

Es el diámetro real del alambre medido en laboratorio (tomamos este valor)

$$\frac{D}{dw} = \frac{2.625}{0.0063} = 416.66$$

Como $416.66 > 400$ por lo tanto cumple el criterio y se evita la deformación permanente del cable.

$$\sigma_b = \frac{Edw}{D} = \frac{14E^6}{416.66} = 33600.5 \text{ psi}$$

$$Ns = \frac{\sigma_{perm}}{\sigma_b} = \frac{222315}{33600.5} = \mathbf{6.61}$$

Presión de aplastamiento

El cable se alarga y frota contra la polea, causando desgaste tanto del cable como de la polea. La cantidad de desgaste depende de la presión sobre el cable en el surco de la polea.

$$P = \frac{2Ft}{Dd}$$

Donde

d = diámetro del cable, m

$$P = \frac{2Ft}{Dd} = \frac{2 \times 65}{(0.0625) \times (42 \times 0.0625)} = 792.3 \text{ psi}$$

Por tanto la presión que se obtiene de la anterior ecuación debe ser menor que la presión máxima que se obtiene de la tabla 6, para varios materiales de poleas y tipos de cables.

Tabla 6. Presión máxima de contacto permisible de cables sobre ranuras de poleas

Cable	Material				
	Madera*	Hierro colado†	Acero colado‡	Hierro colado§	Acero al manganeso¶
Torcido regular:					
6 x 7	150	300	550	650	1470
6 x 19	250	480	900	1100	2400
6 x 37	300	585	1075	1325	3000
8 x 19	350	680	1260	1550	3500
Torcido Lang:					
6 x 7	165	350	600	715	1650
6 x 19	275	550	1000	1210	2750
6 x 37	330	660	1180	1450	3300

* Sobre grano extremo de madera de haya, nogal o árbol de goma.

† Para H_B (mín) = 125.

‡ Con 30-40 de carbono; H_B (mín) = 160.

§ Utilícese sólo con dureza uniforme en la superficie.

¶ Para altas velocidades con poleas equilibradas que tienen superficies esmeriladas.

Fuente: *Wire Rope Users Manual*, AISI, 1979.

Fuente: HAMROCK, Design of Machine Elements

Por tabla 6, la P perm. Para una polea de acero = 1650 psi

$$N_s = \frac{P_{perm}}{P} = \frac{1650}{792} = 2.08$$

Si bien este factor es un poco más bajo que los obtenidos anteriormente por esfuerzos de tensión y flexión respectivamente, no representa una situación crítica de falla inminente sino que pronostica la presencia de fatiga al encontrarse estos dos factores relacionados entre sí como veremos a continuación.

Fatiga

Para que el cable tenga una larga vida útil, la fuerza de fricción total F_t debe ser menor que la fuerza de fatiga permisible

$$(F_t < F_f)$$

$$F_f = S_u \times d \times \frac{Dt_{ambor}(min)}{2000} = 280E^3 \times 0.0625 \times \frac{2.625}{2000} = 23$$

$$N_s = \frac{F_f}{F_t} = \frac{23}{65} = \mathbf{0.35}$$

Siendo esta situación la más crítica, se realizará a continuación un estudio específico de esta, con el ánimo de incrementar el factor de seguridad de la misma. Cabe resaltar que esta condición deberá ser controlada mediante un programa de mantenimiento preestablecido que considere actividades de inspección periódica durante el tiempo de vida útil del cable.

Corrección del factor de seguridad por *fatiga*

Teniendo en cuenta que el cable se encuentra sometido continuamente a la flexión, es probable que presente una falla por rotura debido a la fatiga; para evitar dicha situación fueron reconsideradas las variables que intervienen en este cálculo.

Según DRUCKER Y TACHAU “theory of wire rope” se encuentra una estrecha correlación de la falla por fatiga con la presión de apoyo por unidad de superficie del área proyectada del cable sobre la garrucha o polea

(presión de aplastamiento), condición que se puede ver en los dos últimos factores de seguridad calculados anteriormente. En base al criterio que maneja este autor, la rotura puede ser pronosticada mediante la relación P/S_u y la curva correspondiente al tipo de cable empleado, que se mostrará más adelante.

Si $P/S_u < 0.0015$ el cable tendrá una *duración indefinida* (larga)

Si $P/S_u > 0.0015$ la vida del cable será *limitada* (corta)

A continuación se presentan algunos valores de resistencia a la rotura (S_u) para materiales típicos de cables.

Tabla 7. Valores típicos de resistencia a la rotura S_u

Acero de arado mejorado (monitor)	$240 < S_u < 280 \times 10^3$
Acero de arado	$210 < S_u < 240 \times 10^3$
Acero de arado dulce	$180 < S_u < 210 \times 10^3$

Fuente: HAMROCK, Design of Machine Elements

Retomando el valor de la presión de aplastamiento obtenido con anterioridad tenemos que:

$$P = \frac{2Ft}{Dd} = \frac{2 \times 65}{(42 \times 0.0625) \times (0.0625)} = 792.3 \text{ psi}$$

Por lo tanto:

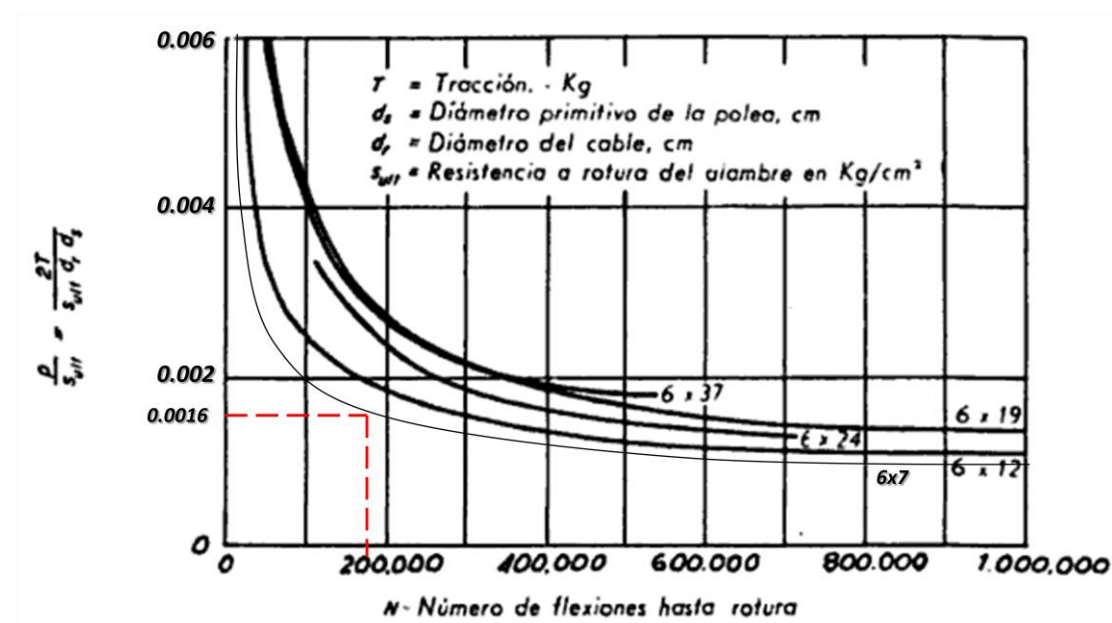
$$P/S_u = 792.3/222.31E^3 = 0.00356 \text{ (pronóstico de duración)}$$

Como

$$0.00356 > 0.0015$$

El cable tendrá poca vida útil, realizando 135 flexiones por día y soportando 50000 flexiones hasta la rotura, durará 370 días (12 meses), según la curva mostrada en la figura 24. Por ello fue necesario analizar cada una de las variables involucradas en la ecuación de pronóstico de duración para de esta manera considerar las posibles alternativas para rebajar este valor lo máximo posible; pues como es sabido una falla de este tipo puede ocurrir sin previo aviso y sus consecuencias en este caso son catastróficas y de gran costo económico.

Figura 24. Pronóstico de vida útil hasta la fatiga en cables metálicos



Fuente: DRUCKER Y TACHAU "theory of wire rope"

Las opciones consideradas fueron las siguientes:

- ❖ Disminuir el valor de F_t a la mitad (32.5lb-f) con lo cual la razón P/S_u se hace igual a 0.001782 y por ende el tiempo de vida útil del cable aumenta. Sin embargo este cambio implica una reducción en la producción del equipo (que se hace $\frac{1}{2}$ del valor inicial), rebajando la rentabilidad del sistema y modificando gran número de componentes.

- ❖ aumentar el diámetro del cable empleado, disminuyendo así el valor de la presión de aplastamiento así como el valor en la ecuación de pronóstico de rotura. Pero esto implica:
 - Mayor demanda en la potencia de consumo del sistema
 - Mayor tamaño de componentes
 - Mayor carga de trabajo (peso por unidad de longitud del cable)
 - Mayor costo de fabricación del equipo

- ❖ aumentar el radio de curvatura sobre el cual el cable es arrollado, tomando un valor mínimo para el cual el efecto de la flexión se reduzca así como la relación que pronostica la rotura.

De estas tres se optó por tomar la última opción que implica un radio base en el tambor de arrollamiento un poco mayor, si bien este cambio produce un

mayor torque requerido en este último, la configuración geométrica de la transmisión flexible permite manejar este arreglo.

De esta manera al pasar de $D = 2.625$ in a un $D = 6$ in se obtiene la siguiente relación de P/Su:

$$P = \frac{2Ft}{Dd} = \frac{2 \times 65}{(0.0625) \times 6} = 346.6 \text{ psi}$$

Por lo tanto:

$$P/Su = 346.6 / 222.315 E^3 = 0.0016$$

Con este valor miramos el pronóstico de duración en la Figura 24.

Valor para el cual corresponden alrededor de 170000 flexiones hasta la rotura, de manera que realizando un promedio de 135 flexiones diarias, el tiempo de vida estimado será de 1260 días (3 ½ años). El cual es un valor razonable en términos de seguridad, mantenimiento y recuperación en la inversión.

Se debe tener en cuenta que la vida del cable se ve afectada por el movimiento relativo de los alambres durante la flexión, lo mismo que por efectos de corrosión.

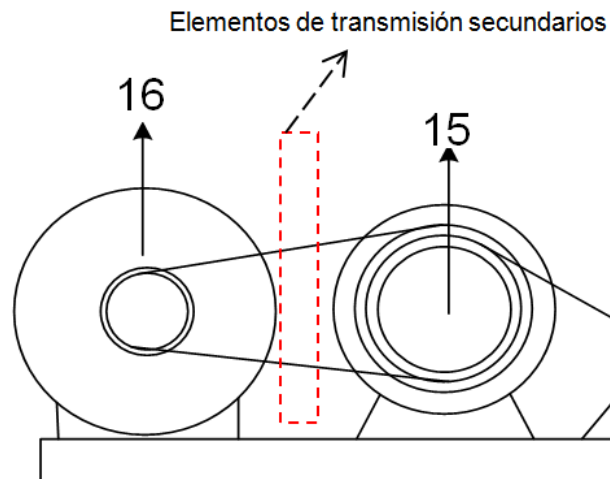
3.1.1.2 Transmisión flexible (bandas y poleas)

El diseño de este importante componente responsable de transmitir la potencia necesaria para el continuo ascenso y descenso de la carga de trabajo del sistema, contempló todo un proceso de análisis físico, mecánico, matemático y económico, encaminado a encontrar la *disposición óptima* y la cantidad mínima de elementos involucrados en el mismo.

Lo anterior obedece a la estrecha relación existente entre el accionador primario o motor y el componente en cuestión; esto debido a que siendo el motor eléctrico el elemento responsable de suministrar la carga dinámica para generar la elevación en el sistema, es claro que implica un consumo energético el cual será un factor importante al momento de determinar la eficiencia y rentabilidad del equipo; por ello la selección y distribución de los *elementos secundarios* que transfieren el torque y la rotación de este primero hacia el tambor de arrollamiento, se ha hecho de tal forma que los valores de potencia suministrada y velocidad no superen 1hp. y 1.0 m/s (en la velocidad del cable) respectivamente.

Esto en razón a las consideraciones de diseño en las cuales se estableció como 1 hp. el valor máximo de potencia eléctrica que se emplearía para obtener un equipo con producción favorable a un bajo costo de funcionamiento y desarrollo, además se fijo una velocidad mayor o igual a 0.5 m/s del cable de elevación para poder asegurar unos valores de extracción de hidrocarburo representativos para un equipo tan sencillo como el propuesto.

Figura 25. Ubicación de los elementos secundarios de transmisión de potencia.



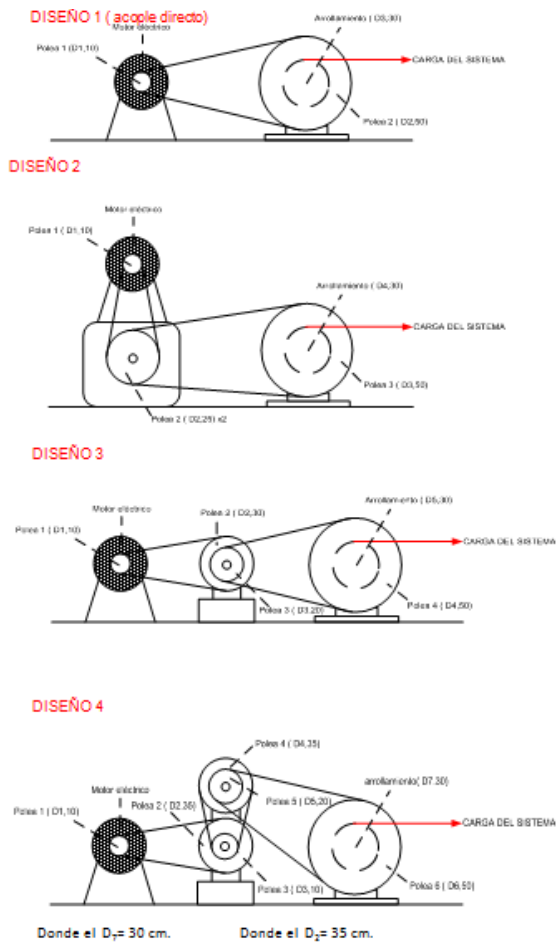
Como se puede apreciar en la figura anterior el acople entre el motor eléctrico y el tambor de arrollamiento, no puede realizarse de manera directa debido a que esto implicaría un diseño si bien compacto y funcional, no conveniente a causa de los grandes tamaños de polea requeridos, lo cual conlleva cero disponibilidad en el mercado de los elementos necesarios y su consecuente manufactura por pedido, que eleva los costos de desarrollo.

Además se estableció como un segundo criterio, que el diámetro máximo por polea no debería ser superior a las 12 pulgadas, como consecuencia de los mayores costos en los que se incurriría al sobrepasar este valor.

De esta manera, contemplando las condiciones pre-establecidas respecto a los tamaños y costos de los elementos involucrados, así como los valores de

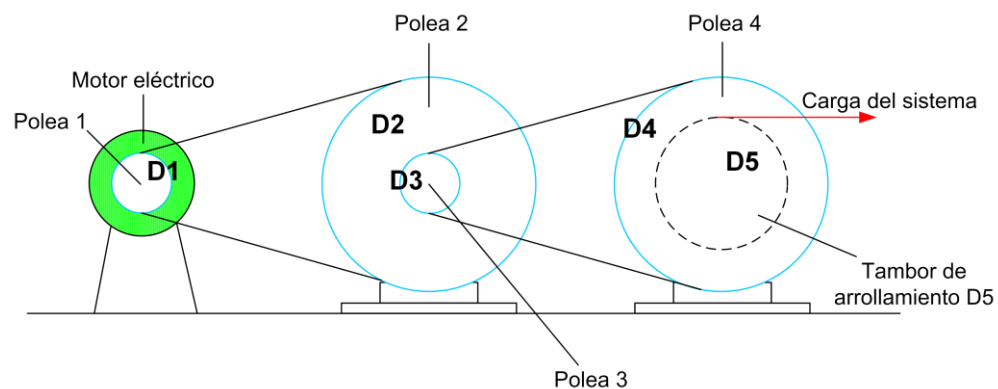
potencia requerida por torque en el tambor de arrollamiento y de potencia media en el motor eléctrico, se procedió a proponer y probar un sinnúmero de configuraciones geométricas de transmisión flexible que respondieran al requerimiento específico; para cada una de ellas se hizo una distribución diferente de elementos móviles, así como tablas de cálculo de las geometrías que más se ajustarán a la potencia de diseño y a la velocidad de desplazamiento.

Figura 26. Diferentes configuraciones geométricas propuestas para el sistema de transmisión



Posteriormente a los cálculos preliminares del torque, velocidad lineal y angular que ofrecía cada propuesta (mostrados más adelante), se procedió a llevar a cabo una tabla de cálculo en *EXCEL* del esquema seleccionado (en este caso se escoge el tercer esquema propuesto) con el fin de encontrar las dimensiones óptimas definitivas.

Figura 27. Distribución del esquema de transmisión seleccionado



Las posibles combinaciones geométricas de este esquema se encuentran listadas en la tabla 8, en la cual se puede apreciar como óptima la cuarta configuración de poleas debido a que:

- Proporciona el torque requerido en el tambor de arrollamiento.
- Maneja un buen valor en la velocidad lineal del cable de elevación, con lo cual se asegura una producción continua y efectiva.
- Requiere una potencia eléctrica de 0.306 Hp. lo que garantiza un funcionamiento y puesta en marcha rentable.
- Las dimensiones de las poleas se encuentran comercialmente disponibles y su precio es aceptable para los costos de producción.

Tabla 8. Posibles combinaciones geométricas del esquema de transmisión seleccionado

D1	D2	D3	D4	D5	Pot. Requerida (HP)	Vel. Cable (m/s)	Motor implementado	RPM motor
10	35	10	35	20	1.0924	0.870	1.50 hp.	1800
10	35	10	35	10	0.5151	0.435	0.75 hp.	1800
10	40	10	40	10	0.4170	0.353	0.50 hp.	1800
6.3	30	6.3	30	35	0.306	0.72	1.00 hp.	1800
10	40	10	40	10	0.8360	0.706	1.00 hp.	3600
10	40	10	40	10	1.0450	0.808	1.50 hp.	3600
10	35	10	35	20	0.7280	0.615	0.75 hp.	1200
10	40	10	40	10	0.5225	0.441	0.75 hp.	1800
10	40	10	40	10	1.0450	0.808	1.50 hp.	3600
10	40	10	40	10	0.8360	0.706	1.00 hp.	3600
15	40	10	40	10	0.6270	0.530	0.75 hp.	1800
15	40	10	40	10	1.2540	1.060	1.50 hp.	3600
15	40	15	40	15	1.4108	1.193	1.50 hp.	1800
20	40	10	40	10	0.8360	0.700	1.00 hp.	1800
10	40	10	40	10	0.6960	0.589	0.75 hp.	1800
10	40	10	40	10	1.3934	1.178	1.50 hp.	3600
10	30	10	30	10	1.2386	1.047	1.50 hp.	1800
10	40	10	40	10	0.6969	0.589	0.75 hp.	1800
10	40	10	40	10	1.3938	1.178	1.50 hp.	3600
10	30	10	30	10	1.5480	1.308	2.00 hp.	1800
10	40	10	40	10	0.5573	0.471	0.75 hp.	1800
10	40	10	40	10	1.1147	0.942	1.50 hp.	3600
15	40	10	40	10	0.8360	0.706	1.00 hp.	1800
15	40	10	40	10	1.6720	1.413	2.00 hp.	3600
25	40	10	40	10	1.3934	1.178	1.50 hp.	1800

Proceso de diseño

La metodología de diseño utilizada para este componente es la presentada por ROBERT L. MOTT en su libro *Diseño de Elementos de Máquinas* (Mac.Graw Hill). En este se sigue el proceso que se muestra a continuación.

Determinación de fuerzas y torques en cada etapa de transmisión

Para comenzar el desarrollo de esta primera etapa, se parte del valor del torque requerido por carga útil en el tambor de arrollamiento; el cual es el producto del valor de tensión en el cable de elevación por el radio mayor del tambor presente en el momento de haber recogido 1000 metros de longitud; dicho valor de radio se maneja en las siguientes ecuaciones, sin embargo su cálculo es realizado en el capítulo 4, sección 4.1.

Para un diámetro **D5** = 19 cm., tenemos entonces un torque requerido en el tambor de arrollamiento igual a:

$$T5 = T_{cable} \times \frac{D5}{2}$$

$$T5 = 30Kg - f \times 9.5cm = 285Kg - f \times cm$$

Para un diámetro **D4** = 30,48 cm.

$$F4 = \frac{T4}{R4}$$

$$F4 = \frac{285Kg - f}{15.24 cm} = 18.7 Kg - f$$

Para un diámetro de **D3** = 6,35 cm.

$$T3 = F4 \times \frac{D3}{2}$$

$$T3 = 18.7Kg - f \times 3.175 = 59.37Kg - f \times cm$$

Para un diámetro de **D2** = 30,48 cm.

$$F2 = \frac{T2}{R2}$$

$$F2 = \frac{59.37Kg - f}{15.24 cm} = 3.89 Kg - f$$

Para un diámetro de **D1** = 6,35 cm.

$$T1 = F2 \times \frac{D1}{2}$$

$$T1 = 3.89Kg - f \times 3.175 = 12.36Kg - f \times cm$$

Potencia requerida :

$$Pm = T1 \times Wm$$

$$Pm = 12.3697Kg - f * cm \times \frac{9.8N}{Kg - f} \times \frac{1m}{100cm} \times 1800rpm \times \frac{2\pi rad}{1rev} \times \frac{1min}{60seg}$$

$$Pm = 228.5 watt$$

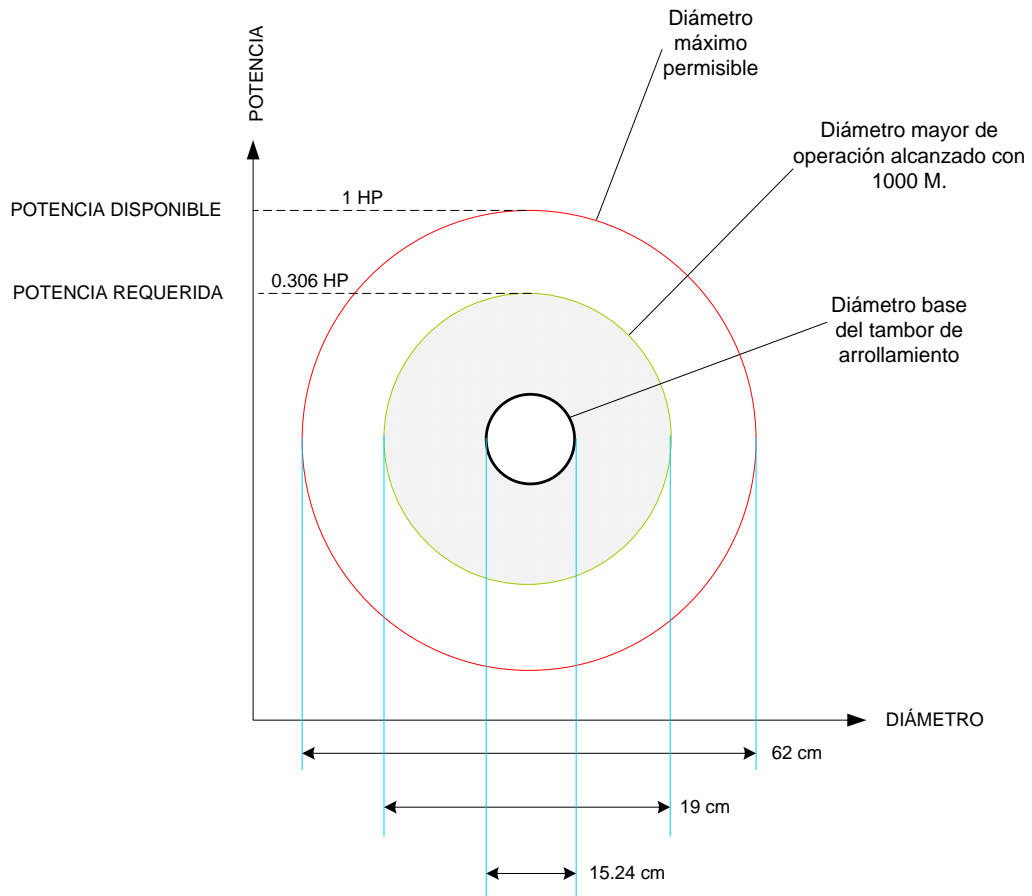
$$1Hp = 745.7 watt$$

Entonces:

$$Pm \approx 0.306 Hp$$

De esta manera se puede ver que la potencia demandada en la situación más exigente correspondiente a aquella en la cual se solicita el máximo torque en el tambor de arrollamiento, es atendida con holgura por un motor eléctrico de 1 hp. Como el que ha sido implementado en el sistema.

Figura 28. Potencia demandada y potencia disponible en el sistema



Velocidades en los elementos de la transmisión

De forma seguida al cálculo de fuerzas y torques, se procede a revisar los valores de velocidad lineal y angular que presenta el sistema, esto con la intención de determinar la rapidez con que se está llevando a cabo el proceso de recuperación de hidrocarburo. Para ello comenzamos por la polea impulsora del motor eléctrico (1680 rpm) y nos vamos desplazando hacia el eje del tambor.

Polea 1 (impulsora motor eléctrico)

$$V1 = Wm \times R1$$

$$V1 = 1680rpm \times \frac{2\pi rad}{1rev} \times \frac{1min}{60seg} \times 0.03175m = 5.585 \frac{m}{seg}$$

Polea 2

$$W2 = \frac{V1}{R2}$$

$$W2 = \frac{5.585 \frac{m}{seg}}{0.1524m} = 36.65 \frac{rad}{seg}$$

$$W2 = 230.29 rpm$$

Polea 3

$$V3 = W3 \times R3$$

$$V3 = 36.65 \frac{rad}{seg} \times 0.03175m = 1.1636 \frac{m}{seg}$$

Polea 4

$$W4 = \frac{V4}{R4}$$

$$W4 = \frac{1.1636 \frac{m}{seg}}{0.1524m} = 7.6351 \frac{rad}{seg}$$

$$W4 = 48 rpm$$

Tambor

$$V5_{\text{máx}} = W5 \times R5_{\text{máx}}$$

$$V5_{\text{máx}} = 7.6351 \frac{\text{rad}}{\text{seg}} \times 0.095\text{m} = \mathbf{0.72} \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

$$V5_{\text{mín}} = W5 \times R5_{\text{mín}}$$

$$V5_{\text{mín}} = 7.6351 \frac{\text{rad}}{\text{seg}} \times 0.0762\text{m} = \mathbf{0.58} \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

De este modo se puede ver que los valores de velocidad lineal mínima y velocidad lineal máxima del cable de elevación se encuentran dentro de los intervalos establecidos en el diseño desde un comienzo; y permiten formular las siguientes conclusiones:

- Conforme el elemento recolector desciende va disminuyendo su velocidad de aproximación al nivel de recuperación determinado; situación favorable pues permite realizar la operación del modo menos intrusivo posible.
- Llegando al nivel cero asignado al suelo o boca del pozo el elemento recolector aumenta su rapidez para llevar a cabo la descarga del crudo rescatado.

Por último verificamos la razón de velocidad para cada etapa, asegurándonos que su valor cumpla el criterio de ser <7 para tener una relación óptima; en este caso la razón para ambas etapas es la siguiente:

$$\frac{0.1524}{0.03175} = 4.8 < 7 \text{ se encuentra bien}$$

Una vez definidos los valores de torques, fuerzas, diámetros y velocidades de los elementos de la transmisión, se procede a realizar el desarrollo del cálculo de la distancia entre centros, el número de bandas y longitud de las mismas, que deben ser incorporadas por cada etapa. Para ello se sigue la metodología expuesta por ROBERT L. MOTT, en su libro *Design of Machine Elements*.

Análisis de la primera etapa (poleas 1 y 2)

Potencia Transmitida ----- 1 hp.

Velocidad del motor ----- 1680 rpm.

Velocidad de salida ----- 230 rpm.

Se procede a determinar la potencia de diseño, identificando el valor del factor de servicio el cual se obtiene en tabla 9. bajo el criterio de Malacate.

Factor de servicio ----- **1,5**.

Por lo tanto la potencia de diseño será calculada como el producto del factor de servicio por la potencia transmitida

$$Pd = 1,5 * 1 hp$$

$$Pd = 1,5 hp$$

Se lleva a cabo una selección preliminar de la sección de banda para una potencia de diseño de $Pd = 1,5 hp$ y una velocidad del conductor de $Nm \approx 1800 rpm$.

Con estos parámetros se mira el tipo de banda apropiado en la figura 29. y se elige una banda 3V o 3XV (*Equivale a una banda tipo A comercial*).

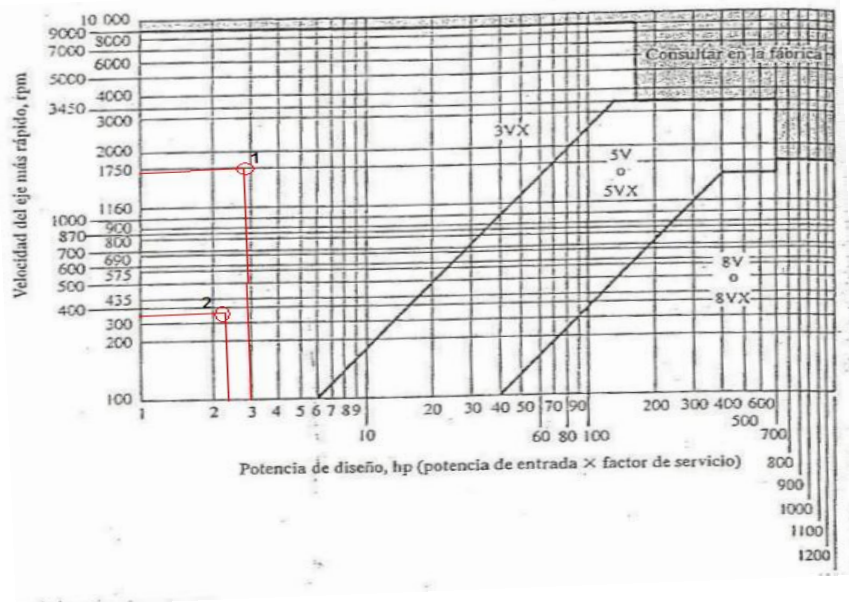
Tabla 9. Factores de servicio para bandas en V

Tipo de máquina impulsada	Tipo de impulsor					
	Motores de CA: par torsional normal ^a Motores de CD: bobinado en derivación Motores de combustión: múltiples cilindros			Motores de CA: Alto par torsional ^b Motores de CD: bobinado en serie, bobinado compuesto Motores de combustión: 4 cilindros o menos		
	<6 h por día	6-15 h por día	>15 h por día	<6 h por día	6-15 h por día	>15 h por día
Agitadores, sopladores, ventiladores, bombas centrífugas, transportadores ligeros	1.0	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3
Generadores, máquinas herramienta, mezcladores, transportadores de grava	1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4
Elevadores de cangilones, máquinas textiles, molinos de martillos, transportadores pesados	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6
Trituradoras, molinos de bolas, malacates, extrusoras de hule	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.8
Toda máquina que se pueda ahogar	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

^aSíncronos, fase dividida, trifásicos con par de torsión de arranque o par de torsión al paro máximo menor que 175% de par torsional con carga total.
^bMonofásicos, trifásicos con par de torsión de arranque o par de torsión al paro máximo menor que 175% de par torsional con carga total.

Fuente: HAMROCK, Design of Machine Elements

Figura 29. Selección de bandas en V industriales



Fuente: HAMROCK, Design of Machine Elements

Se fijan los diámetros de poleas

Polea 1 ----- **D1** = 6,35 cm. = 2,5 pulg.

Polea 2 ----- **D2** = 30,48 cm. = 12 pulg.

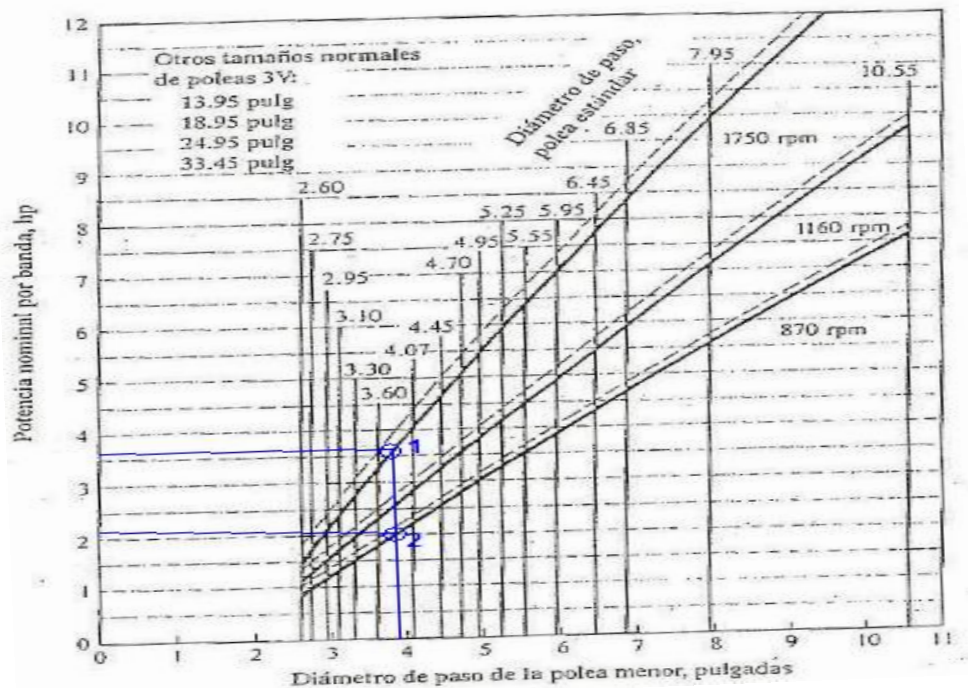
Se establece la potencia nominal para la banda 3V o 3VX.

Diámetro de paso de la polea conductora (en este caso la #1)

Polea 1 ----- **D1** = 6,35 cm. = 2,5 pulg.

Y se revisa a continuación el valor de potencia nominal por banda sugerido en la figura 30.

Figura 30. Potencia nominal por banda



Fuente: HAMROCK, Design of Machine Elements

P_n = potencia nominal de banda.

$P_n = 1,8 \text{ hp.}$

Se calcula a continuación la distancia tentativa entre centros, la cual será un parámetro fijo e importante en el diseño del sistema, pues en base a este se realiza la distribución de elementos en el componente motriz, de modo que resulte lo más compacto posible.

Por criterio de diseño, le distancia entre centros (C) debe cumplir lo siguiente:

$$D_2 \leq C \leq 3(D_2 + D_1).$$

$$12 \text{ pulg.} \leq C \leq 3(12 \text{ pulg.} + 2,5 \text{ pulg.})$$

$$12 \text{ pulg.} \leq C \leq 43,5 \text{ pulg.}$$

Se selecciona una distancia tentativa inicial de:

$$C_t = 35,56 \text{ cm} = 14 \text{ pulg.}$$

Se procede con el cálculo de longitud de banda (L):

$$L = 2 C_t + 1,57 (D_2 + D_1) + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4 C_t}.$$

$$L = 2(14) + 1,57(12 + 2,5) + \frac{(12 - 2,5)^2}{4(14)} = 52,3766 \text{ pulg.}$$

$$L = 52,3766 \text{ pulg.}$$

Se selecciona una longitud Estándar por tabla 10, igual a:

$$L = 53 \text{ pulg.}$$

$$L = 134,62 \text{ cm.}$$

Tabla 10. Longitudes de banda estándar

Sólo 3V	3V y 5V	3V, 5V y 8V	5V y 8V	Sólo 8V
25	50	100 ²	150	375
26.5	53	106	160	400
28	56	112	170	425
30	60	118	180	450
31.5	63	125	190	475
33.5	67	132	200	500
35.5	71	140	212	
37.5	75	146	224	
40	80		236	
42.5	85		250	
45	90 ¹		265	
47.5	95		280	
			300	
165			315	
			335	

Fuente: HAMROCK, Design of Machine Elements

A continuación se re-define la distancia real entre centros:

$$C = \frac{B + \sqrt{B^2 - 32(D2 - D1)^2}}{16}$$

$$B = 4L - 6.28(D2 + D1)$$

$$B = (4 \times 53) - 6.28(12 + 2.5)$$

$$B = 120.94$$

$$C = \frac{120.94 + \sqrt{120.94^2 - 32(12 - 2.5)^2}}{16} = 14.33 \text{ pulg}$$

$$C = 36.4 \text{ cm}$$

Se determina el ángulo de contacto de la polea menor (θ_1)

$$\theta_1 = 180 - 2\text{sen}^{-1}\left(\frac{D2 - D1}{2C}\right)$$

$$\theta_1 = 180 - 2\text{sen}^{-1}\left(\frac{12 - 2.5}{2 \times 14}\right) = 141.28^\circ$$

$$\theta_1 = 141.28^\circ$$

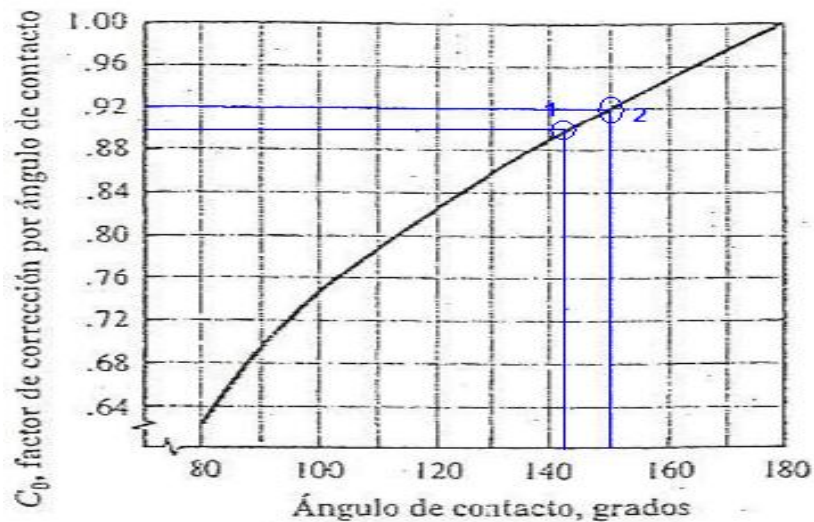
Se debe tener en cuenta que el ángulo mínimo de contacto de la polea conductora no debe ser menor a 120 grados para así prevenir daños prematuros, por lo tanto los resultados son aceptables.

Se obtienen de tabla 11. y tabla 12. los factores de corrección para la potencia nominal de la banda.

$$C_\theta = 0.90$$

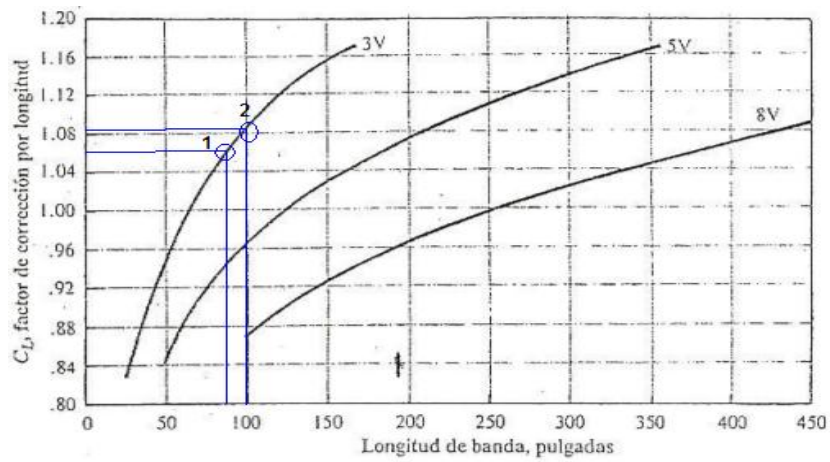
$$C_L = 0.96$$

Tabla 11. Factor de corrección por ángulo de contacto



Fuente: HAMROCK, Design of Machine Elements

Tabla 12. Factor de corrección por longitud de banda



Fuente: HAMROCK, Design of Machine Elements

Se realiza el cálculo de la potencia nominal corregida por la banda.

$$P_{nc} = P_{nom} \times C_\theta \times C_L$$

$$P_{nc} = 1.8 \text{ Hp} \times 0.9 \times 0.96 = 1.55 \text{ Hp}$$

$$P_{nc} = 1.55 \text{ Hp}$$

Y se establece el número de bandas a utilizar como:

$$\#BANDAS = \frac{P_d}{P_{nc}}$$

$$\#BANDAS = \frac{1.5 \text{ Hp}}{1.55 \text{ Hp}}$$

$$\#BANDAS = 0.9645$$

$$\#BANDAS \approx 1$$

Los parámetros de diseño obtenidos para la primera etapa de la transmisión flexible son resumidos en la tabla 13.

Tabla 13. Parámetros de diseño obtenidos en la primera etapa de transmisión

PRIMERA ETAPA – POLEAS 1 Y 2	
Poleas	
Polea 1	D1 = 6,35cm. = 2,5 pulg.
Polea 2	D2 = 30,48 cm. = 12 pulg.
Entrada	
Pm	= 1hp.
Nm	= 1680 rpm.
Factor de servicio	= 1,5.
Potencia de diseño	Pd = 1,5 hp.
Banda	
L	= 53 pulg = 134,62 cm.
# Bandas	= 1.
Θ_1	= 141.28
Tipo	
POLEA	de 1 canal tipo 3V (banda equivalente tipo A comercial).
Velocidad de salida	ns = 230 rpm.
Distancia entre centros	C = 14,33 pulg. = 36,4 cm.

Análisis de la segunda etapa (poleas 3 y 4)

Del mismo modo en que se realizó la secuencia de pasos para la primera etapa de transmisión, se desarrolló al análisis de esta segunda etapa mostrada a continuación.

$$P3 = T3 \times W3$$

$$P3 = 109.37Kg - f * cm \times \frac{9.8N}{Kg - f} \times \frac{1m}{100cm} \times 230.29rpm \times \frac{2\pi rad}{1rev} \times \frac{1min}{60seg}$$

$$P3 = 258.48 Watt$$

$$P3 = 258.48Watt \times \frac{1Hp}{745.7Watt} = 0.34Hp$$

Potencia Transmitida ----- 0.34 hp.

Velocidad del conductor ----- 230.29 rpm.

Velocidad de salida ----- 48 rpm.

Se procede a determinar la potencia de diseño, identificando el valor del factor de servicio el cual se obtiene en tabla 9. bajo el criterio nuevamente de un Malacate.

Factor de servicio ----- **1,5**.

Por lo tanto la potencia de diseño será calculada como el producto del factor de servicio por la potencia transmitida

$$Pd = 1,5 * 0.34 \text{ hp}$$

$$Pd = 0.51 \text{ hp}$$

Se lleva a cabo una selección preliminar de la sección de banda para una potencia de diseño de $Pd = 0.51 \text{ hp}$ y una velocidad del conductor de $Nm \approx 230.3 \text{ rpm}$.

Con estos parámetros se mira el tipo de banda apropiado en la figura 29. y se elige una banda 3V o 3XV (*Equivale a una banda tipo A comercial*).

Se fijan los diámetros de poleas

Polea 3 ----- **D3** = 6,35 cm. = 2,5 pulg.

Polea 4 ----- **D4** = 30,48 cm. = 12 pulg.

Se establece la potencia nominal para la banda 3V o 3VX.

Diámetro de paso de la polea conductora (en este caso la #3)

Polea 3 ----- **D3** = 6,35 cm. = 2,5 pulg.

Y se revisa a continuación el valor de potencia nominal por banda sugerido en la figura 30.

P_n = potencia nominal de banda.

$P_n = 0.5 \text{ hp.}$

En este punto se debe aclarar que el valor anteriormente obtenido para la potencia nominal transmitida por banda no está determinado específicamente en la figura 30., para la velocidad que se necesita por lo tanto dicho valor se toma por extrapolación de la grafica. Se calcula a continuación la distancia tentativa entre centros, la cual será un parámetro fijo e importante en el diseño del sistema, pues en base a este se realiza la distribución de elementos en el componente motriz, de modo que resulte lo más compacto posible.

Por criterio de diseño, le distancia entre centros (C) debe cumplir lo siguiente:

$$D_4 \leq C \leq 3(D_4 + D_3).$$

$$12 \text{ pulg.} \leq C \leq 3(12 \text{ pulg.} + 2,5 \text{ pulg.})$$

$$12 \text{ pulg.} \leq C \leq 43,5 \text{ pulg.}$$

Se selecciona una distancia tentativa inicial de:

$$C_t = 35,56 \text{ cm} = 14 \text{ pulg.}$$

Se procede con el cálculo de longitud de banda (L):

$$L = 2 C_t + 1,57 (D_4 + D_3) + \frac{(D_4 - D_3)^2}{4 C_t}.$$

$$L = 2(14) + 1,57(12 + 2,5) + \frac{(12 - 2,5)^2}{4(14)} = 52,3766 \text{ pulg.}$$

$$L = 52,3766 \text{ pulg.}$$

Se selecciona una longitud Estándar por tabla 10, igual a:

$$L = 53 \text{ pulg.}$$

$$L = 134,62 \text{ cm.}$$

A continuación se re-define la distancia real entre centros:

$$C = \frac{B + \sqrt{B^2 - 32(D4 - D3)^2}}{16}$$

$$B = 4L - 6.28(D4 + D3)$$

$$B = (4 \times 53) - 6.28(12 + 2.5)$$

$$B = 120.94$$

$$C = \frac{120.94 + \sqrt{120.94^2 - 32(12 - 2.5)^2}}{16} = 14.33 \text{ pulg}$$

$$C = 36.4 \text{ cm}$$

Se determina el ángulo de contacto de la polea menor. (θ_3)

$$\theta_3 = 180 - 2\text{sen}^{-1}\left(\frac{D4 - D3}{2C}\right)$$

$$\theta_3 = 180 - 2\text{sen}^{-1}\left(\frac{12 - 2.5}{2 \times 14}\right) = 141.28^\circ$$

$$\theta_3 = 141.28^\circ$$

El cual también cumple con ser mayor a 120 grados que es el ángulo mínimo de contacto que debe tener la polea conductora.

Se obtienen de tabla 11. y tabla 12. los factores de corrección para la potencia nominal de la banda.

$$C\theta = 0.90$$

$$CL = 0.96$$

Se realiza el cálculo de la potencia nominal corregida por la banda.

$$P_{nc} = P_{nom} \times C\theta \times CL$$

$$P_{nc} = 0.5 \text{ Hp} \times 0.9 \times 0.96 = 0.432 \text{ Hp}$$

$$P_{nc} = 0.432 \text{ Hp}$$

Y se establece el número de bandas a utilizar como:

$$\#BANDAS = \frac{Pd}{P_{nc}}$$

$$\#BANDAS = \frac{0.51 \text{ Hp}}{0.432 \text{ Hp}}$$

$$\#BANDAS = 1.18$$

$$\#BANDAS \approx 1$$

Los parámetros de diseño obtenidos para la segunda etapa de la transmisión flexible son resumidos en la tabla 14.

Tabla 14. Parámetros de diseño obtenidos en la segunda etapa de transmisión

SEGUNDA ETAPA – POLEAS 3 Y 4	
Poleas	
Polea 3 -----	D3 = 6.35 cm = 2.5 pulg
Polea 4 -----	D4 = 30.48 cm = 12 pulg
Entrada	
P3 = 0.34 Hp	
N3 = 230.3 rpm	
Factor de servicio ----- 1.5	
Potencia de diseño ----- Pd = 0.51Hp	
Banda	
L = 53 pulg = 134.62 cm	
# Bandas = 1.	
$\Theta_3 = 141.28$	
Tipo	
POLEA de 1 canal tipo 3V (banda equivalente tipo A comercial).	
Velocidad de salida -----	ns = 48 rpm
Distancia entre centros -----	C = 14.33 pulg = 36.4 cm

3.1.1.3 Marco principal del componente motriz

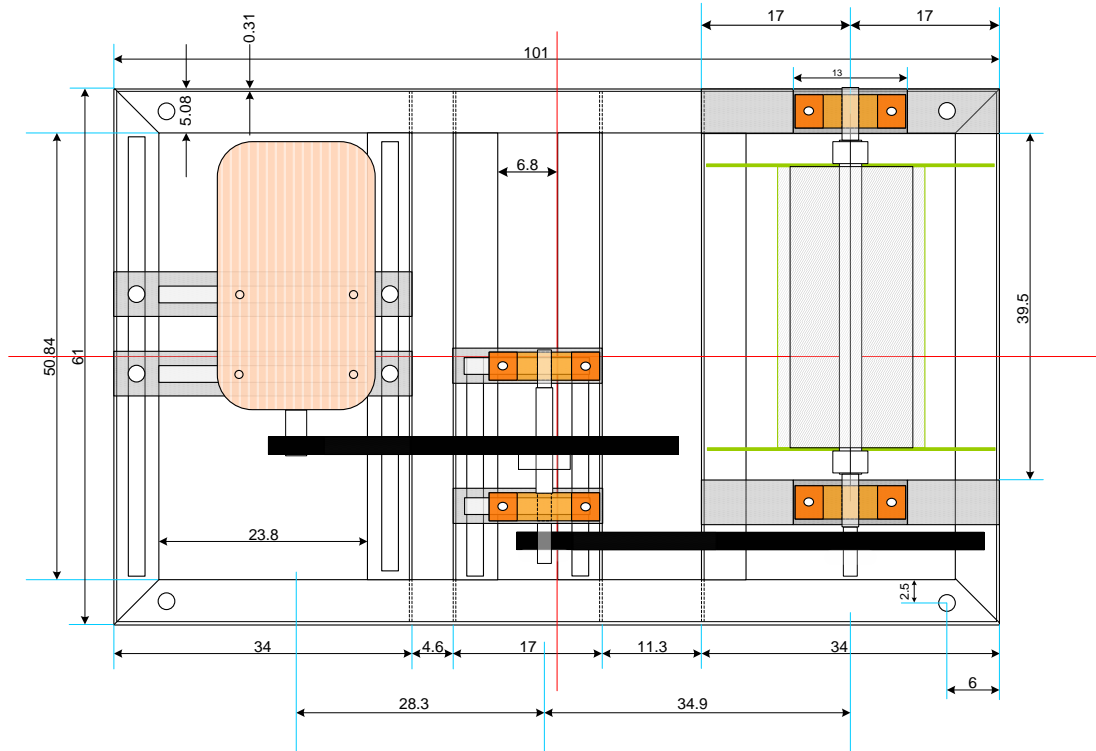
Este marco base constituye una pieza indispensable al sistema, pues se encuentra encargado de soportar en buena parte la mayor cantidad de carga por peso propio del equipo, sobre él es llevado a cabo el montaje de otros componentes tales como:

- motor eléctrico
- tambor de arrollamiento
- ejes y chumaceras
- transmisión flexible por poleas y bandas
- sistema de control de operación
- tornillería de ensamble
- elementos de alineación y tensionamiento

El diseño de éste fue elaborado de manera posterior a la realización del cálculo de la transmisión flexible así como el del tambor de arrollamiento, debido a que el tamaño o dimensiones generales de este primero dependían de resultados tales como los diámetros de poleas y las distancias entre centros que de dicho análisis se obtenían.

Teniendo claro el concepto que se manejó desde un principio de diseñar y construir un equipo sencillo y compacto, se procedió a distribuir y montar con la ayuda de un sistema CAD, el esquema de componentes virtuales que serían implementados en el mismo; así se pudo determinar las posiciones específicas de cada pieza en el plano, correspondientes a los valores geométricos que se habían obtenido con anterioridad.

Figura 31. Distribución en planta del componente motriz



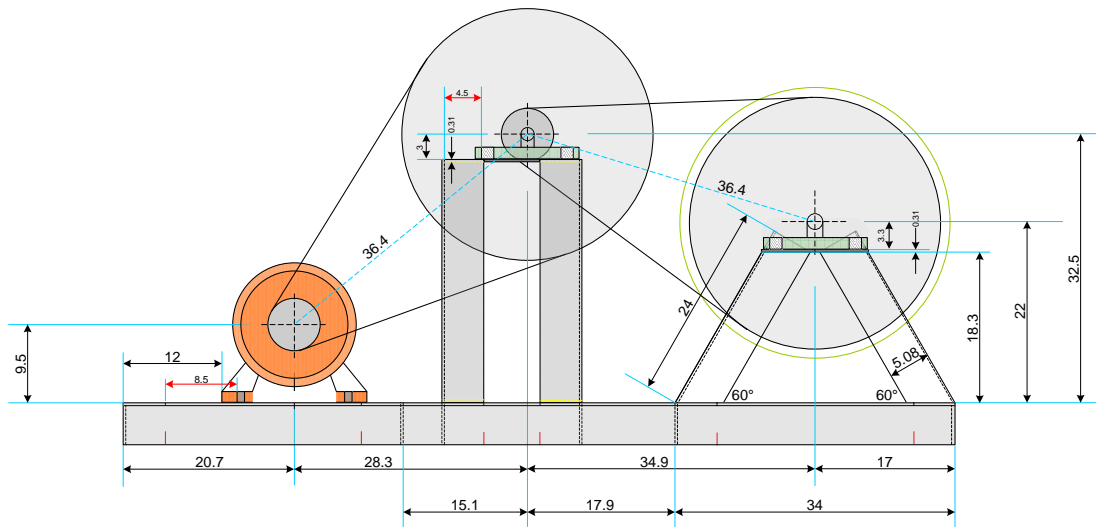
De igual forma el diseño virtual de este componente permitió definir los elementos y el margen de distancias que se manejarían para poder llevar a cabo lo siguiente:

- alineación de poleas y bandas de la transmisión flexible
- pre-tensionamiento de bandas

De este modo se pudo aprovechar al máximo cada unidad de área base del componente motriz, lo cual se traduce en mínimas dimensiones, poco

espacio de montaje y menor cantidad de perfil estructural empleado en su fabricación.

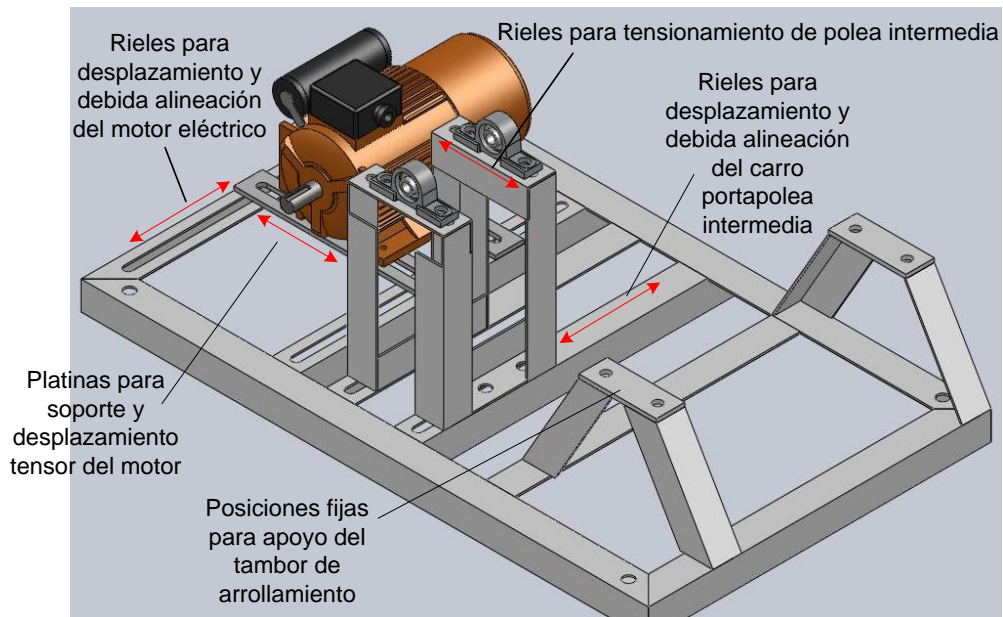
Figura 32. Distancias de pre-tensionamiento disponible (rojo)



Una vez definidas las dimensiones totales de este conjunto, se procede a elaborar la construcción virtual del mismo; para de manera seguida llevar el componente al módulo de análisis por el método de elementos finitos (Simulation Xpress Study) que ofrece el programa Solid Works, mediante dicho análisis se logra identificar los valores de esfuerzos y deformaciones a los que se ve sometida la pieza bajo el estado de cargas específico.

Este estudio estructural es clave para las piezas y componentes que han sido implementados en este sistema, ya que permite validar los cálculos teóricos y así garantizar seguridad y confiabilidad del equipo.

Figura 33. Construcción virtual del marco principal del componente motriz



Los resultados del análisis de esfuerzos y deformaciones de este componente bajo carga mostraron que el máximo valor de esfuerzo por tensión se presenta en las secciones de poca inercia, correspondientes a perfiles planos con espesores de 1/8 de pulgada; sin embargo este esfuerzo no produce falla de rotura en ninguna parte de la pieza, ni tampoco deformaciones permanentes sino de tipo elástico que llegan máximo a los **1.22 mm** de desplazamiento, el cual no origina interferencias en el montaje ni mal funcionamiento del mismo.

Su análisis gráfico es presentado en las siguientes imágenes.

Figura 34. Estado de esfuerzos en el marco principal

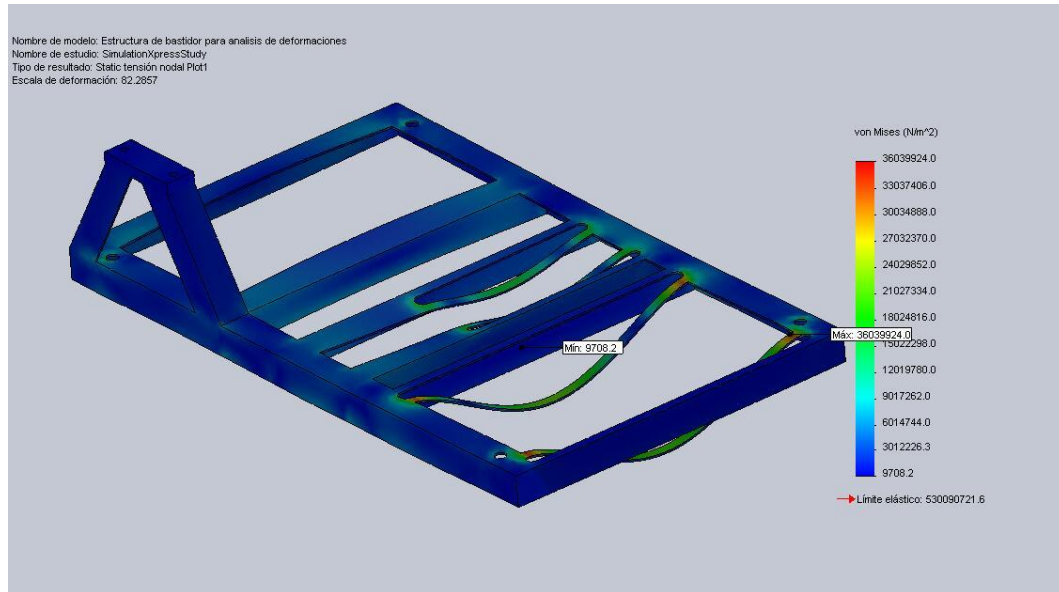
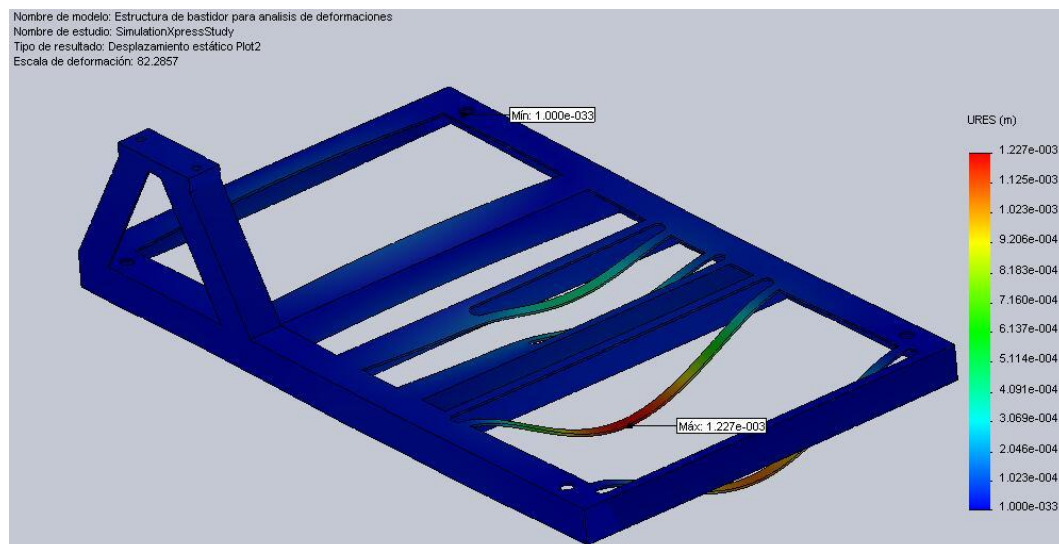


Figura 35. Deformaciones elásticas en el marco principal bajo carga



Llevada a cabo la conceptualización teórica y virtual de la distribución, montaje, elaboración y resistencia del componente, se procede a su construcción física; para la cual se emplean un total de:

- 10 metros de perfil estructural tipo (L) de 2" x 1/8"
- 2 platinas de 35 cm cada una y espesor de 2" x 5/16"
- 22 tornillos 3/4"
- 20 electrodos tipo 6013

El proceso de elaboración consistió en el corte de los tramos de perfil ya definidos para el posterior armado mediante aplicación del cordón de soldadura 6013; a continuación se realizan los mecanizados correspondientes al fresado de los rieles de desplazamiento y pre-tensionamiento así como el taladrado de los agujeros para las uniones desmontables.

Por último se realiza el recubrimiento con base anticorrosiva alquídica para la posterior aplicación del esmalte correspondiente.

Figura 36. Perfil estructural 2" x 1/8" que conforma el marco principal

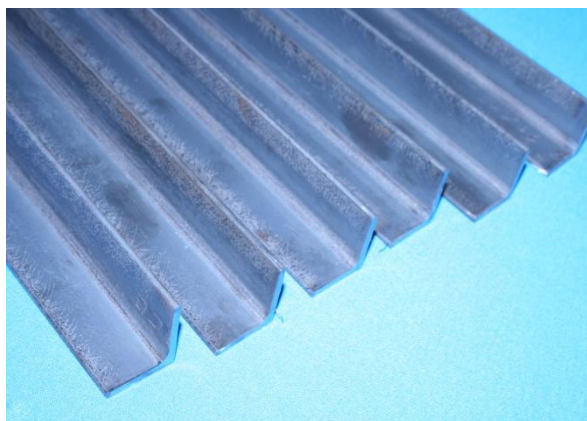
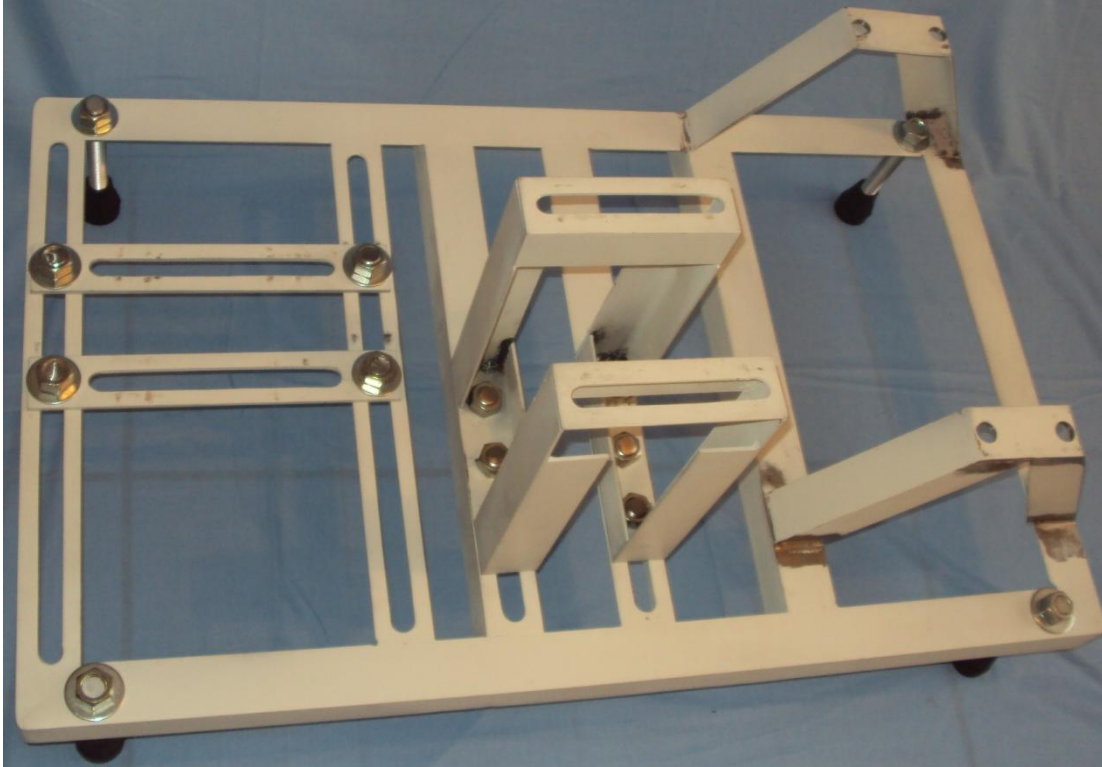


Figura 37. Marco principal del componente motriz construido



3.1.1.4 Ejes

El diseño de estos elementos se realizó bajo la metodología expuesta por ROBERT L. MOTT, en su libro “Design of Machine Elements” y se aplicó específicamente en:

- Diseño del eje del tambor de arrollamiento
- Diseño del eje de la polea intermedia para transmisión de potencia

A continuación mostraremos el desarrollo matemático de cada uno de ellos.

Eje del tambor de arrollamiento

Para iniciar el desarrollo de éste elemento se comienza por presentar un esquema de número de diámetros preliminares que tendrá el elemento en cuestión; los cuales son identificados inmediatamente

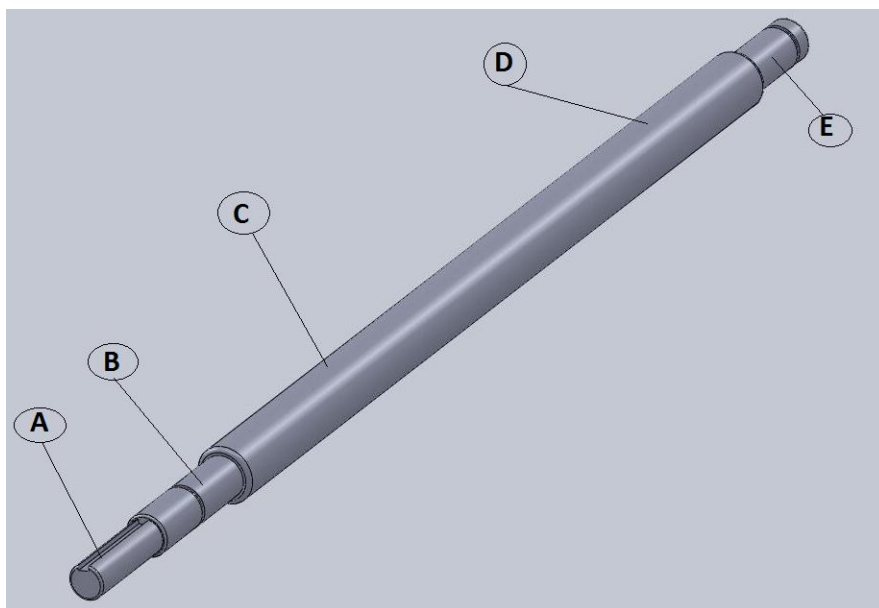
D_A = diámetro de la polea

D_B = diámetro del rodamiento 1

$D_C = D_D$ = diámetro del tambor

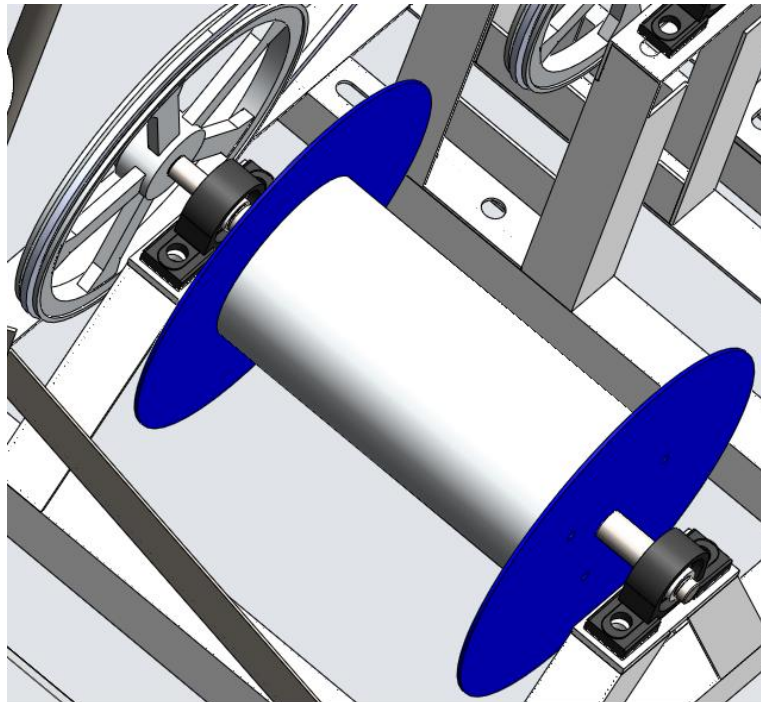
D_E = diámetro del rodamiento 2

Figura 38. Diámetros a calcular en el eje del tambor de arrollamiento



A continuación se muestran los componentes que han sido dispuestos sobre dicho eje.

Figura 39. Disposición de elementos sobre el eje del tambor de arrollamiento



Variables definidas en para el cálculo del eje

P_T = potencia recibida de la transmisión	$P_T = 0,6 \text{ Hp}$
n_e = velocidad del eje en rpm	$n_e = 78,125 \text{ rpm}$

Procedemos a definir las propiedades del material en el cual se elaborará el eje.

Acero Aisi 1045 estirado en frio

S_y = resistencia a la fluencia	$S_y = 84000 \text{ Psi}$ [tabla A6. Diseño de Mott]
S_u = resistencia a la tensión o ultima	$S_u = 100.000 \text{ Psi}$
S_n = resistencia a la fatiga	$S_n = 59000 \text{ Psi}$ [Figura 5.8 Diseño de Mott]

Establecemos los factores de corrección para la seguridad.

- Confiabilidad----- $C_R = 0,90$ [tabla 5.1 Diseño de Mott]
- Factor de material----- $C_m = 1,00$ en aceros forjados
- Factor por tamaño para un diámetro aproximado igual a 1 pulg
 $C_s = 0,88$ [Tomado del libro de diseño de Mott. Fig 5.8]
- Factor de tipo de esfuerzo----- $C_{st} = 1,00$ para esfuerzos flexionantes
- Resistencia modificada a la fatiga

$$S_n' = S_n * C_s * C_R * C_m * C_{St}$$

$$S_n' = 59000 \text{ Psi} * 0,88 * 0,90 \quad S_n' = 46728 \text{ Psi}$$

- Factor de Diseño

$N = 2,0$ a $2,5$.

Teniendo como criterio el diseño de elementos de máquinas bajo cargas dinámicas con una confianza promedio en todos los datos de diseño tomamos el siguiente valor.

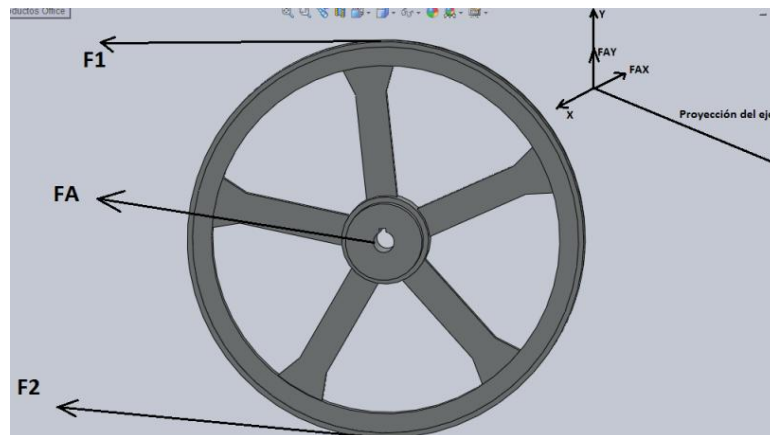
$N = 2,0 \rightarrow$ valor seleccionado para este caso

A continuación determinamos las cargas para cada sección preestablecida del eje.

$$T_A = \frac{63000 * P_T}{n_e} \quad [\text{Lb} * \text{pulg}]$$

$$T_A = \frac{63000 * 0,6H_p}{78,125 \text{ rpm}} \quad \rightarrow \quad T_A = 483,84 \text{ Lb} * \text{pulg}$$

Figura 40. Fuerzas sobre la polea A



F_N = Fuerza impulsora neta

$$F_N = \frac{T_A}{D_A/2}$$

F_A = fuerza flexionante sobre el eje

$$F_A = 1,5 F_N$$

$$F_A = 1,5 \frac{T_A}{D_A/2} \rightarrow F_A = 1,5 \frac{[558,6153] \text{Lb} \cdot \text{pulg}}{12 \text{pulg} / 2} \rightarrow F_A = 139,654 \text{ Lb}$$

Las componentes de esta fuerza serán:

$$F_{Ax} = F_A \cos\theta \rightarrow F_{Ax} = 141,12 \cos 45^\circ \rightarrow F_{Ax} = 98,75 \text{ Lb}$$

$$F_{Ay} = F_A \sin\theta \rightarrow F_{Ay} = 141,12 \sin 45^\circ \rightarrow F_{Ay} = 98,75 \text{ Lb}$$

Determinamos las fuerzas sobre el tambor que serán transmitidas al eje, la ubicación de las mismas se encuentran en las dos figuras siguientes.

Figura 41. Fuerzas de la polea A sobre el eje

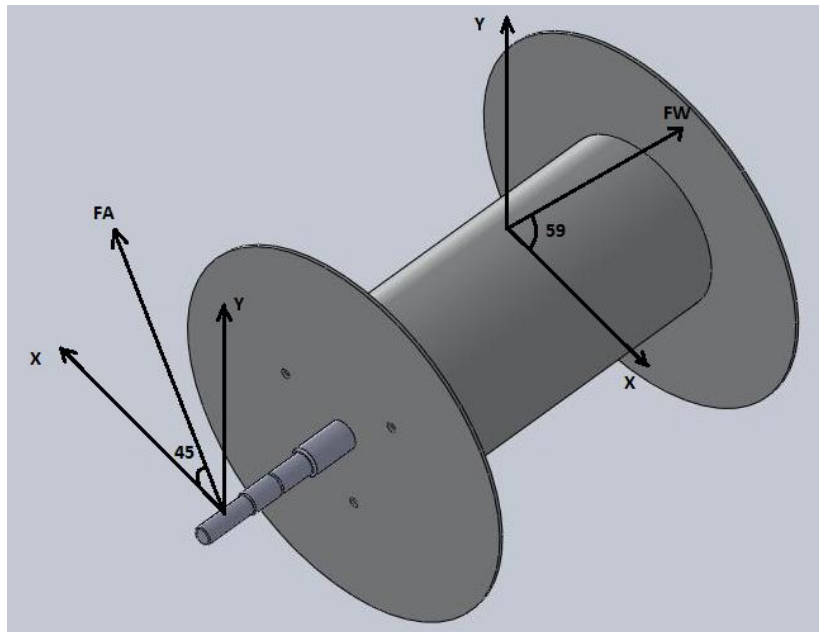
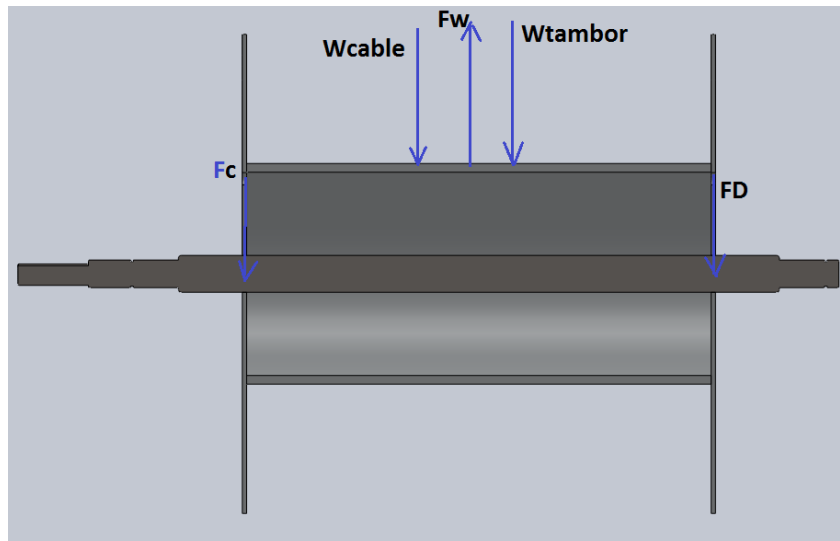


Figura 42. Fuerzas sobre el cilindro base del tambor de arrollamiento



Con el ánimo de llevar a cabo un buen estudio de este componente, se han considerado los tres siguientes casos; de este modo se determina la geometría más adecuada para el elemento en diseño.

Caso 1:

El cable se encuentra en el medio del tambor de enrollamiento

$$F_{Wx} = F_w \cos \theta$$

$$F_{Wx} = 60 \text{Lbf} * \cos 59^\circ$$

$$F_{Wx} = 30,9 \text{ Lbf}$$

$$F_{Wy} = F_w \sin \theta$$

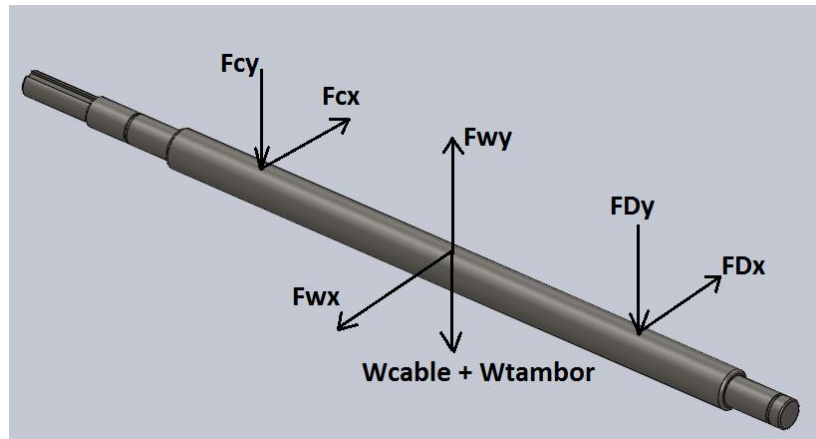
$$F_{Wy} = 60 \text{Lbf} * \sin 59^\circ$$

$$F_{Wy} = 51,43 \text{ Lbf}$$

Donde $W_{\text{cable}} = 10 \text{ Kgf} = 22 \text{ Lbf}$

$W_{\text{tambor}} = 10 \text{ kgf} = 22 \text{ Lbf}$

Figura 43. Componentes de carga sobre el eje para el caso 1



Plano X-Z

$$\sum M_C = 0$$

$$F_{DX} \cdot m = F_{Wx} \cdot m/2$$

$$F_{DX} = \frac{30.9}{2} \rightarrow F_{DX} = 15.45 \text{ Lbf.}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{Wx} - F_{DX} = F_{Cx}$$

$$F_{Cx} = 30.9 - 15.45 \rightarrow F_{Cx} = 15.45 \text{ Lbf}$$

Plano Y- Z

$$\sum M_C = 0$$

$$[F_{Wy} - W_{\text{cable}} - W_{\text{tambor}}] * m/2 - F_{Dy} * m = 0$$

$$[51.43 - 22 - 22] * \frac{1}{2} = F_{Dy}$$

$$F_{Dy} = 3.715 \text{ Lbf}$$

$$F_y = 0$$

$$F_{Wy} - W_{\text{cable}} - W_{\text{tambor}} - F_{Dy} - F_{Cy} = 0$$

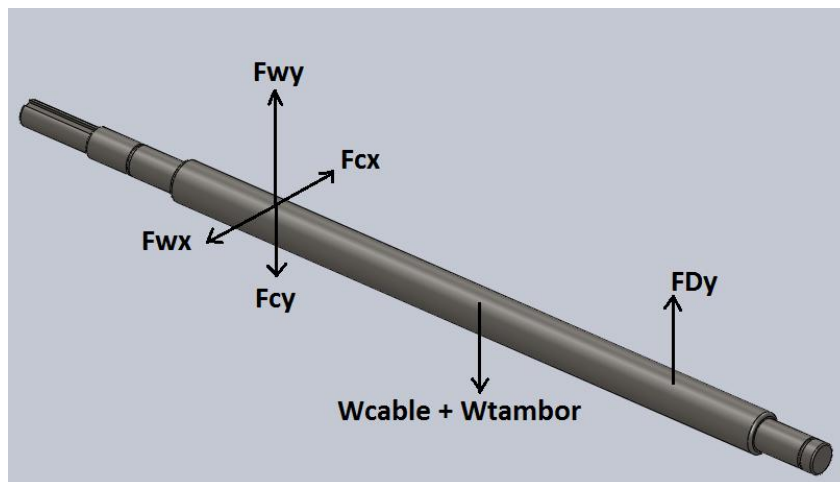
$$F_{Cy} = 51.43 - 22 - 22 - 3.715$$

$$F_{Cy} = 3.715 \text{ Lbf}$$

Caso 2:

El cable se encuentra desplazado totalmente hacia la parte izquierda del tambor de arrollamiento

Figura 44. Componentes de carga sobre el eje para el caso 2



Plano Y-Z

$$\sum M_C = 0$$

$$F_{Dy} * m = [W_{cable} + W_{tambor}] * m/2$$

$$F_{Dy} = [22 + 22] * 1/2$$

$$F_{Dy} = 22 \text{ Lbf}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{Wy} + F_{Dy} - [W_{cable} + W_{tambor}] = F_{Cy}$$

$$F_{Cy} = 51.43 + 22 - [22 + 22]$$

$$F_{Cy} = 29.43 \text{ Lbf}$$

Plano X-Z

$$\sum F_x = 0$$

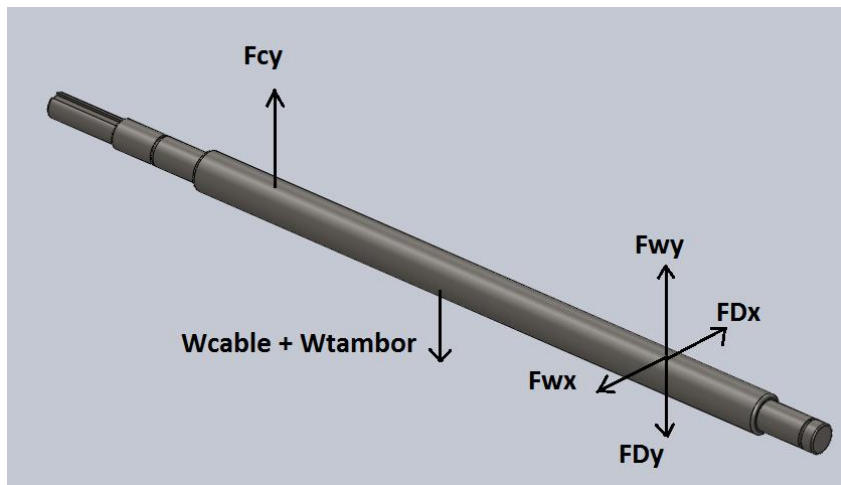
$$F_{Wx} = F_{Cx}$$

$$F_{Cx} = 30,9 \text{ Lbf}$$

Caso 3:

El cable se encuentra totalmente desplazado a la parte derecha del tambor de enrollamiento

Figura 45. Componentes de carga sobre el eje para el caso 3



Plano Y-Z

$$\sum M_c = 0$$

$$F_{Wy} * m - [W_{cable} + W_{tambor}] * m/2 = F_{Dy} * m$$

$$F_{Dy} = 51.43 - [22 + 22] * 1/2$$

$$F_{Dy} = 29.43 \text{Lbf}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{Cy} = [W_{cable} + W_{tambor}] + F_{Dy} - F_{Wy}$$

$$F_{Cy} = [22+22] + 29.43 - 51.43$$

$$F_{Cy} = 22 \text{Lbf}$$

Plano X-Z

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{Wx} = F_{Dx}$$

$$F_{Dx} = 30,9 \text{ Lbf}$$

Procedemos a realizar la distribución general de las fuerzas para cada caso en particular considerado.

Caso 1:

Plano Y-Z

$$\sum M_B = 0$$

$$F_{Ey} * 55.45 = - F_{Dy} * 49,2 - F_{Cy} * 7,8 + F_{Ay} * 7,95$$

$$F_{Ey} = [-3.715 * 49,2 - 3.715 * 7.8 + 98.75 * 7.95] * 1/55.45$$

$$F_{Ey} = 10.34 \text{ Lbf}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{Ay} + F_{Cy} + F_{Dy} + F_{Ey} = F_{By}$$

$$F_{By} = 98.75 + 3.715 + 3.715 + 10.34$$

$$F_{By} = 116.52 \text{ Lbf}$$

Plano X-Z

$$\sum M_B = 0$$

$$F_{Ex} * 55.45 = F_{Dx} * 49,2 + F_{Cx} * 7,8 + F_{Ax} * 7,95$$

$$F_{Ex} = [15.45 * 49,2 + 15.45 * 7.8 + 98.75 * 7.95] * 1/55.45$$

$$F_{Ex} = 30.04 \text{ Lbf}$$

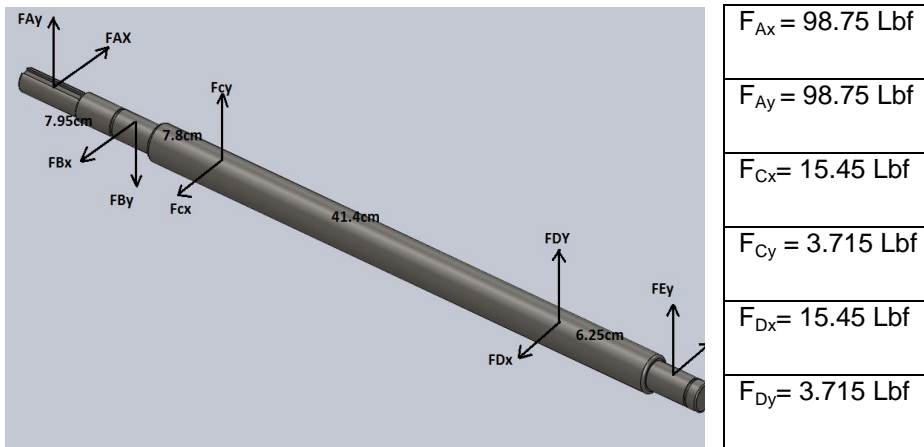
$$\sum F_x = 0$$

$$F_{Ax} - F_{Cx} - F_{Dx} + F_{Ex} = F_{Bx}$$

$$F_{Bx} = 98.75 - 15.45 - 15.45 + 30.04$$

$$F_{Bx} = 97.89 \text{ Lbf}$$

Figura 46. Distribución general de fuerzas para el caso 1



Caso 2:

Plano Y-Z

$$\sum M_B = 0$$

$$F_{Ey} * 55.45 = F_{Dy} * 49.2 - F_{Cy} * 7.8 + F_{Ay} * 7.95$$

$$F_{Ey} = [22 * 49.2 - 29.43 * 7.86 + 98.75 * 7.95] * 1/55.45$$

$$F_{Ey} = 29.5 \text{ Lbf}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{Ay} + F_{Cy} - F_{Dy} + F_{Ey} = F_{By}$$

$$F_{By} = 98.75 + 29.43 + 29.5 - 22$$

$$F_{By} = 135.68 \text{ Lbf}$$

Plano X-Z

$$\sum M_B = 0$$

$$F_{Ex} * 55.45 = F_{Cx} * 7.8 + F_{Ax} * 7.95$$

$$F_{Ex} = [30.09 * 7.8 + 98.75 * 7.95] * 1/55.45$$

$$F_{Ex} = 18.39 \text{ Lbf}$$

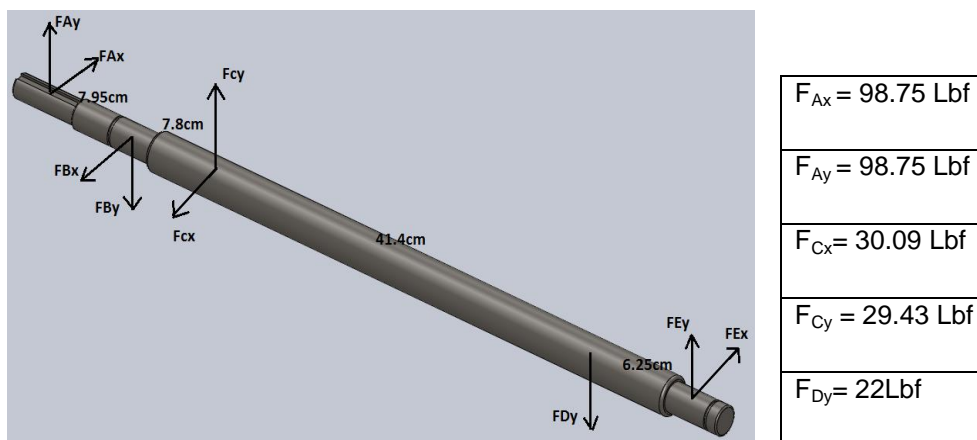
$$\sum F_x = 0$$

$$F_{Ax} - F_{Cx} + F_{Ex} = F_{Bx}$$

$$F_{Bx} = 98.75 + 18.39 - 30.09$$

$$F_{Bx} = 87.05 \text{ Lbf}$$

Figura 47. Distribución general de fuerzas para el caso 2



Caso 3:

Plano Y-Z

$$\sum M_B = 0$$

$$-F_{Ey} * 55.45 = -F_{Dy} * 49.2 + F_{Cy} * 7.8 + F_{Ay} * 7.95$$

$$-F_{Ey} = [-29.43 * 49.2 + 22 * 7.8 + 98.75 * 7.95] * 1/55.45$$

$$F_{Ey} = 8.86 \text{ Lbf}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{Ay} - F_{Cy} + F_{Dy} - F_{Ey} = F_{By}$$

$$F_{By} = 98.75 + 29.43 - 22 - 8.86$$

$$F_{By} = 97.32 \text{ Lbf}$$

Plano X-Z

$$\sum M_B = 0$$

$$F_{Ex} * 55.45 = F_{Dx} * 49.2 + F_{Ax} * 7.95$$

$$F_{Ex} = [30.09 * 49.2 + 98.75 * 7.95] * 1/55.45$$

$$F_{Ex} = 41.58 \text{ Lbf}$$

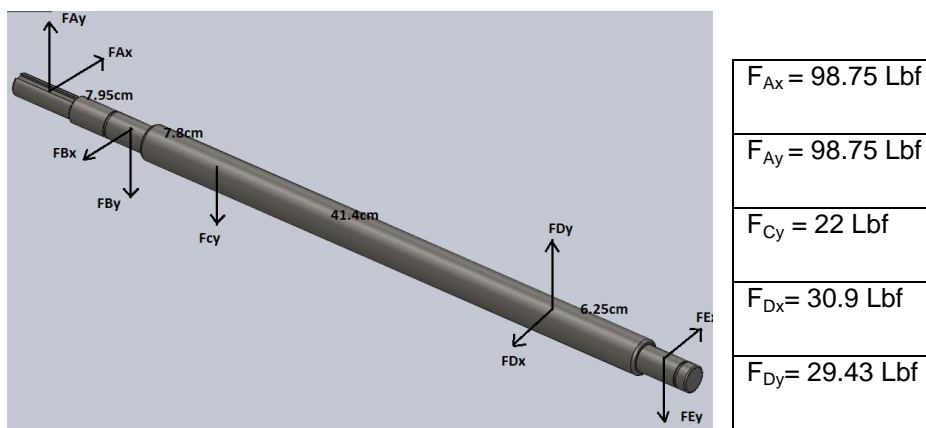
$$\sum F_x = 0$$

$$F_{Ax} - F_{Dx} + F_{Ex} = F_{Bx}$$

$$F_{Bx} = 98.75 + 41.58 - 30.9$$

$$F_{Bx} = 109.43 \text{ Lbf}$$

Figura 48. Distribución general de fuerzas para el caso 3



Los diagramas correspondientes a carga, esfuerzo cortante y momento de cada uno de los casos considerados se muestran en las siguientes figuras.

Figura 49. Diagramas correspondientes al caso 1 para el Plano Y - Z

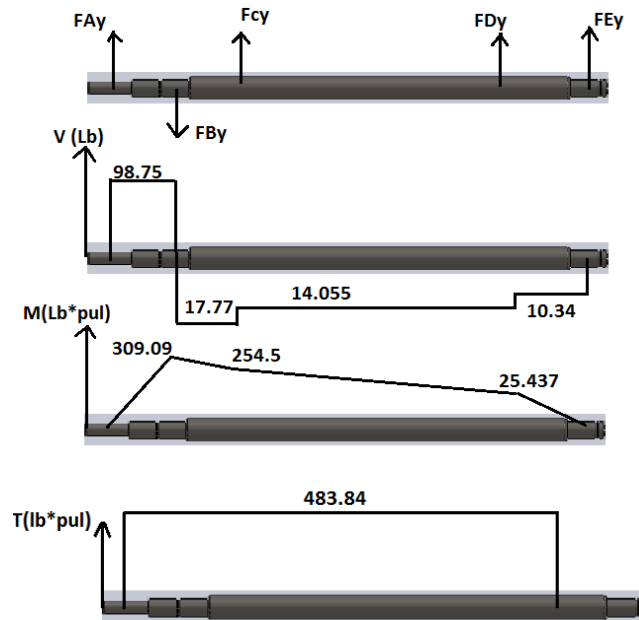


Figura 50. Diagramas correspondientes al caso 1 para el Plano X - Z

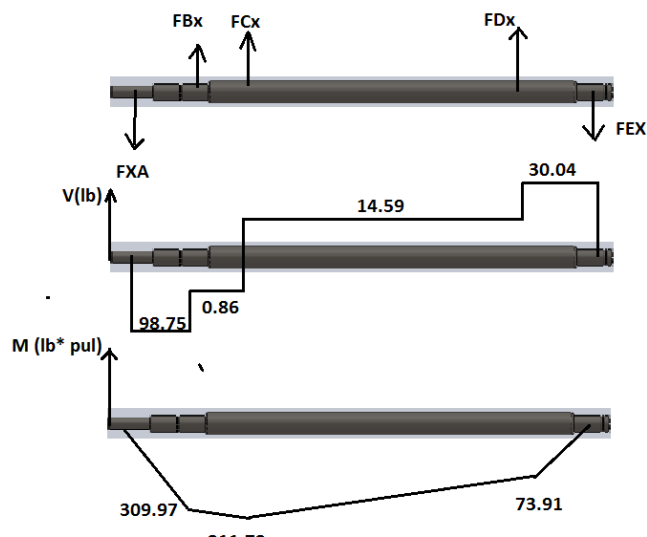


Figura 51. Diagramas correspondientes al caso 2 para el Plano Y - Z

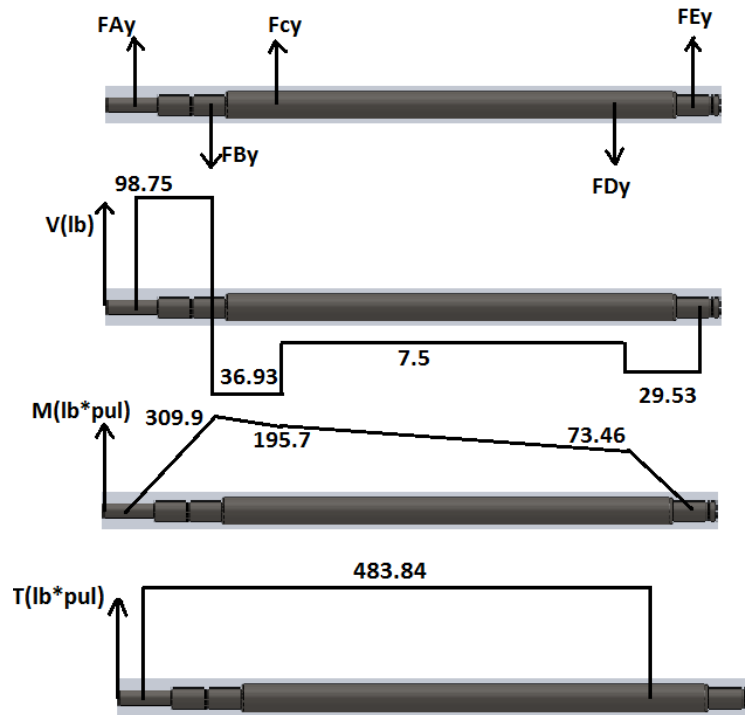


Figura 52. Diagramas correspondientes al caso 2 para el Plano X - Z

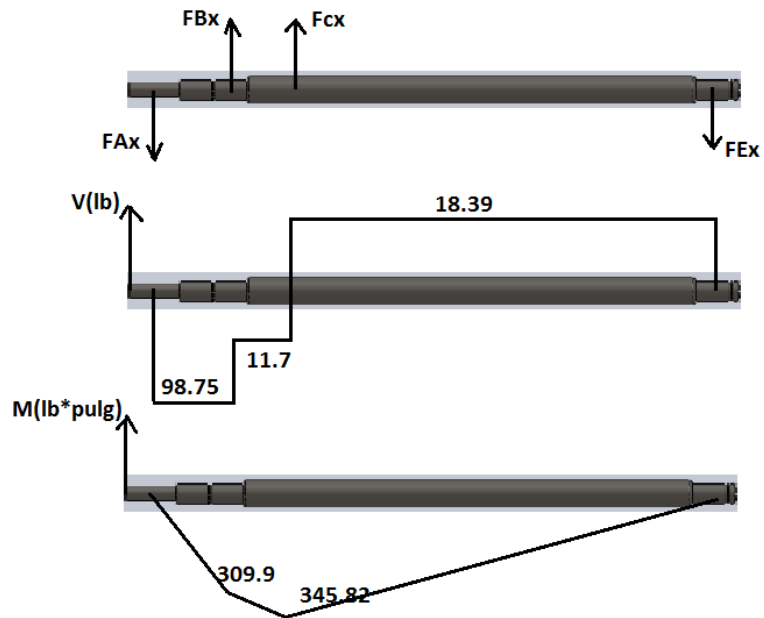


Figura 53. Diagramas correspondientes al caso 3 para el Plano Y - Z

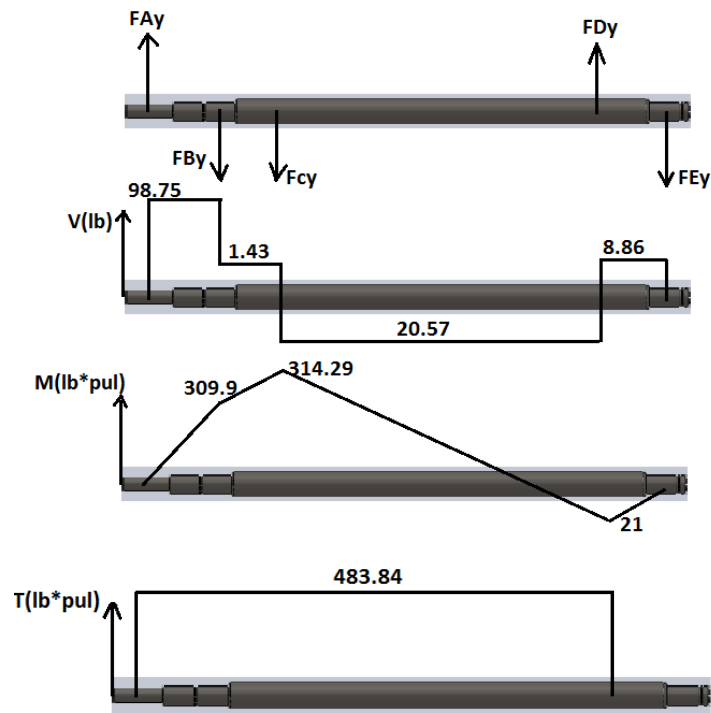
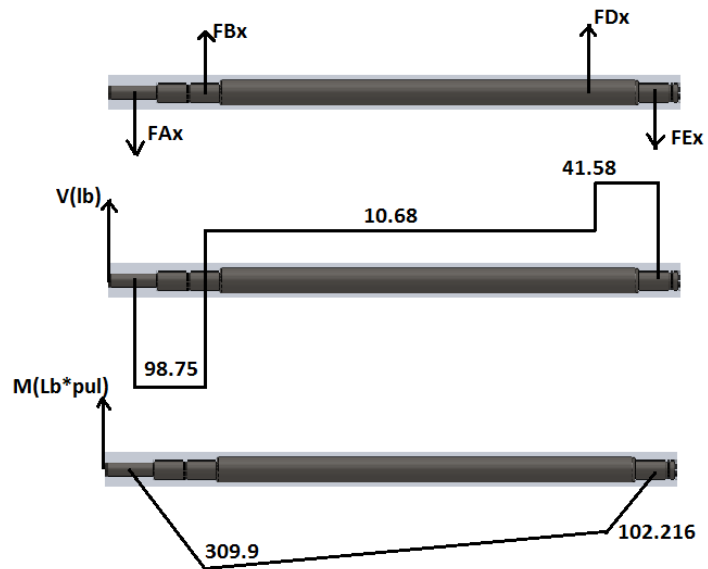


Figura 54. Diagramas correspondientes al caso 3 para el Plano X - Z



Se determina el valor de los diámetros mínimos aceptables para el eje

Caso 1:

$$M_B = \sqrt{(309,9)^2 + (309,9)^2} \rightarrow M_B = 438,265 \text{ Lb*Pulg.}$$

$$M_C = \sqrt{(254,5)^2 + (311,73)^2} \rightarrow M_C = 402,425 \text{ Lb*Pulg.}$$

$$M_D = \sqrt{(25,437)^2 + (73,91)^2} \rightarrow M_D = 78,164 \text{ Lb*Pulg.}$$

$$T = 483,84 \text{ Lb*Pulg.}$$

$$V_E = \sqrt{(10,34)^2 + (30,04)^2} \rightarrow V_E = 31,77 \text{ Lb*Pulg.}$$

Punto A

$$D_A = \left[\frac{32 \times N}{\pi} \sqrt{+ \frac{3}{4} \left(\frac{T_A}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \rightarrow D_A = \left[\frac{32 \times 2}{\pi} \sqrt{+ \frac{3}{4} \left(\frac{483,84}{84000} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_A = 0,467 \text{ Pulg.}$$

Aumentaremos un 6% el valor de (D_A) debido a la cuña que se le realiza

$$D_A = \mathbf{0,494} \text{ Pulg}$$

Punto B

Anillo de retención $k_t = 2 \rightarrow$ Factor por detalles

$$D_B = \left[\frac{32 \times N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t}{S_n'} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T_B}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \rightarrow D_B = \left[\frac{32 \times 2}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2 \times 438,265}{46728} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{483,84}{84000} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_B = 0.733 \text{ Pulg.}$$

Se debe aumentar un 3% del valor de D_B para complementar el material retirado en el anillo de retención.

$$D_B = \mathbf{0.76} \text{ Pulg.}$$

Punto C

Cuñeros de perfil $K_t = 2 \rightarrow$ Factor por detalles

$$D_C = \left[\frac{32 \times N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t \cdot M_C}{S_n'} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T_C}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \rightarrow D_C = \left[\frac{32 \times 2}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 402,425}{46728} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{483,84}{84000} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_C = 0,715 \text{ Pulg.}$$

Se debe aumentar un 6% del valor de D_C debido al material retirado por la cuña

$$D_C = \mathbf{0.758} \text{ Pulg.}$$

Punto D

Cañero de perfil $k_t = 2 \rightarrow$ Factor por detalles

$$D_D = \left[\frac{32 \times N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t \cdot M_D}{S_n'} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T_D}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \rightarrow D_D = \left[\frac{32 \times 2}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 78,164}{46728} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{483,84}{84000} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_D = 0.496 \text{ Pulg.}$$

Se debe aumentar un 6% del valor de D_D debido material retirado por la cuña

$$D_D = 0.526 \text{ Pulg.}$$

Punto E

Anillo de retención $kt = 2 \rightarrow$ Factor por detalles

$$D_E = \sqrt{\left(2,94Kt * V_E * \frac{N}{S_n'}\right)} \rightarrow D_E = \sqrt{\left(2,94(2) * 31,77 * \frac{2}{46728}\right)}$$

$$D_E = 0.089 \text{ Pulg}$$

Se debe aumentar el 3% del valor inicial determinado de D_E debido al material retirado por el anillo retenedor

$$D_E = 0,0948 \text{ Pulg.}$$

Caso 2:

$$M_B = \sqrt{(309,9)^2 + (309,9)^2} \rightarrow M_B = 438,265 \text{ Lb*Pulg.}$$

$$M_C = \sqrt{(195,7)^2 + (345,82)^2} \rightarrow M_C = 397,35 \text{ Lb*Pulg.}$$

$$M_D = \sqrt{73,46^2} \rightarrow M_D = 73,46 \text{ Lb*Pulg.}$$

$$T = 483,84 \text{ Lb*Pulg.}$$

$$V_E = \sqrt{(29,53)^2 + (18,39)^2} \rightarrow V_E = 34,79 \text{ Lb*Pulg.}$$

Punto A

$$D_A = \left[\frac{32 \times N}{\pi} \sqrt{+ \frac{3}{4} \left(\frac{T_A}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \rightarrow D_A = \left[\frac{32 \times 2}{\pi} \sqrt{+ \frac{3}{4} \left(\frac{483,84}{84000} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_A = 0,467 \text{ Pulg.}$$

Aumentaremos un 6% del valor de (D_A) debido al material que se retira por la cuña

$$D_A = \mathbf{0,494} \text{ Pulg.}$$

Punto B

Anillo de retención $k_t = 2 \rightarrow$ Factor por detalles

$$D_B = \left[\frac{32 \times N}{\pi} \left(\frac{K_t \cdot M_B}{S_n'} \right)^2 \sqrt{+ \frac{3}{4} \left(\frac{T_B}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \rightarrow D_B = \left[\frac{32 \times N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 438,265}{46728} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{483,84}{84000} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_B = 0.733 \text{ Pulg.}$$

Se debe aumentar un 3% del valor de D_B para complementar el material retirado por el anillo de retención.

$$D_B = \mathbf{0.755} \text{ Pulg.}$$

Punto C

Cuñeros de perfil = 2 \rightarrow Factor por detalles

$$D_C = \left[\frac{32 \times N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t \cdot M_C}{S_n'} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T_C}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \rightarrow D_C = \left[\frac{32 \times 2}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 397,35}{46728} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{483,84}{84000} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_C = 0,712 \text{ Pulg.}$$

Se debe aumentar un 6% del valor de D_C debido al material retirado por la cuña

$$D_C = 0,755 \text{ Pulg.}$$

Punto D

Cuñero de perfil $k_t = 2 \rightarrow$ Factor por detalles

$$D_D = \left[\frac{32 \times N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t \cdot M_D}{S_n'} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T_D}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \rightarrow D_D = \left[\frac{32 \times 2}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 73,46}{46728} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{483,84}{84000} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_D = 0,493 \text{ Pulg.}$$

Se debe aumentar un 6% del valor de D_D debido material retirado por la cuña

$$D_D = 0,523 \text{ Pulg.}$$

Punto E

Anillo de retención $k_t = 2 \rightarrow$ Factor por detalles

$$D_E = \sqrt{\left(2.94Kt * V_E * \frac{N}{S_{n'}}\right)} \rightarrow D_E = \sqrt{\left(2.94(2) * 34,79 * \frac{2}{46728}\right)}$$

$$D_E = 0,0936 \text{ Pulg.}$$

Se debe aumentar el 3% del valor inicial determinado de D_E debido al material retirado por el anillo retenedor

$$D_E = \mathbf{0,096} \text{ Pulg.}$$

Caso 3:

$$M_B = \sqrt{(309,9)^2 + (309,9)^2} \rightarrow M_B = 438,265 \text{ Lb*Pulg.}$$

$$M_C = \sqrt{(314,29)^2} \rightarrow M_C = 314,29 \text{ Lb*Pulg.}$$

$$M_D = \sqrt{(21,00)^2 + (102,216)^2} \rightarrow M_D = 104,35 \text{ Lb*Pulg.}$$

$$T = 483,84 \text{ Lb*Pulg.}$$

$$V_E = \sqrt{(8,86)^2 + (41,58)^2} \rightarrow V_E = 42,51 \text{ Lb*Pulg.}$$

Punto A

$$D_A = \left[\frac{32 \times N}{\pi} \sqrt{+ \frac{3}{4} \left(\frac{T_A}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \rightarrow D_A = \left[\frac{32 \times 2}{\pi} \sqrt{+ \frac{3}{4} \left(\frac{483,84}{84000} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_A = 0,467 \text{ Pulg.}$$

Aumentaremos un 6% del valor de (D_A) debido al material que se retira por la cuña

$$D_A = \mathbf{0,494} \text{ Pulg.}$$

Punto B

Anillo de retención $k_t = 2 \rightarrow$ Factor por detalles

$$D_B = \left[\frac{32 \times N}{\pi} \left(\frac{K_t * M_B}{S_n'} \right)^2 \sqrt{+ \frac{3}{4} \left(\frac{T_B}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$
$$D_B = \left[\frac{32 \times N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2 * 438,265}{46728} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{483,84}{84000} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_B = 0,733 \text{ Pulg.}$$

Se debe aumentar un 3% del valor de D_B para complementar el material retirado en el anillo de retención.

$$D_B = \mathbf{0,755} \text{ Pulg.}$$

Punto C

Cañeros de perfil $K_t = 2 \rightarrow$ Factor por detalles

$$D_C = \left[\frac{32 \times N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t * M_C}{S_n'} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T_C}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \rightarrow D_C = \left[\frac{32 \times 2}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2 * 314,29}{46728} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{483,84}{84000} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_C = 0,664 \text{ Pulg.}$$

Se debe aumentar un 6% del valor de D_C debido al material retirado por la cuña

$$D_C = \mathbf{0,70} \text{ Pulg.}$$

Punto D

Cañero de perfil $kt = 2 \rightarrow$ Factor por detalles

$$D_D = \left[\frac{32 \times N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t * M_D}{S_{n'}} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T_D}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \rightarrow D_D = \left[\frac{32 \times 2}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2 * 104,35}{46728} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{483,84}{84000} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_D = 0,515 \text{ Pulg.}$$

Se debe aumentar un 6% del valor de D_D debido al material retirado por la cuña

$$D_D = \mathbf{0,546} \text{ Pulg.}$$

Punto E

Anillo de retención $kt = 2 \rightarrow$ Factor por detalles

$$D_E = \sqrt{\left(2,94 Kt * V_E * \frac{N}{S_{n'}} \right)} \rightarrow D_E = \sqrt{\left(2,94(2) * 42,51 * \frac{2}{46728} \right)}$$

$$D_E = 0,103 \text{ Pulg.}$$

Se debe aumentar el 3% del valor inicial determinado de D_E debido al material retirado por el anillo retenedor

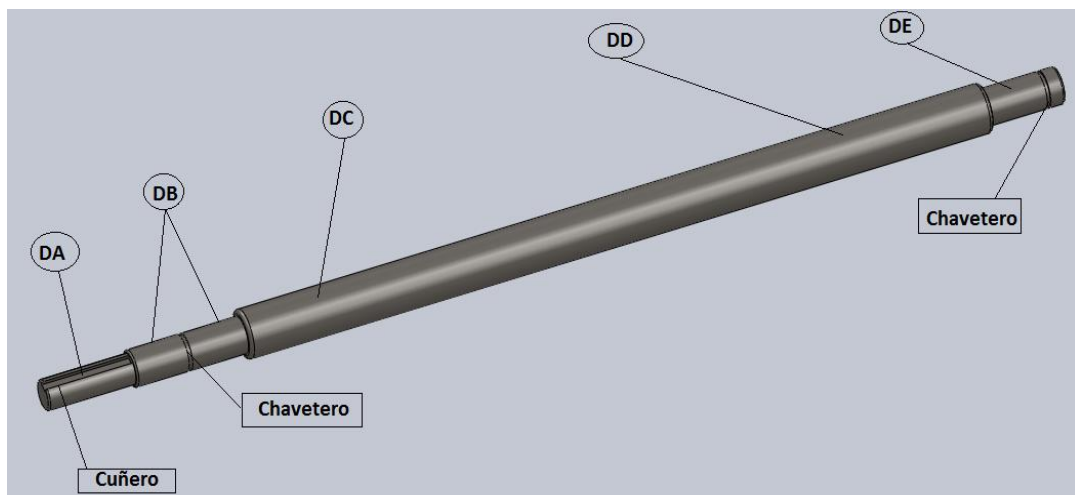
$$D_E = \mathbf{0,106} \text{ Pulg.}$$

De esta manera quedan seleccionados los valores de los diámetros en los cuales se mecanizará el eje del tambor de arrollamiento, los cuales se listan en la siguiente tabla.

Tabla 15. Diámetros establecidos para el eje del tambor de arrollamiento

Sección	D _{minimos}	D _{seleccionados}
D _A	0.494 pulg	5/8 pulg
D _B	0.755 pulg	3/4 pulg
D _C	0.758 pulg	1 pulg
D _D	0.546 pulg	1 pulg
D _E	0.106 pulg	3/4 pulg
Chavetero B	3/4	3/4
Chavetero E	3/4	3/4
Cuñero A	a x b	a x b
	3/16 x 3/16	3/16 x 3/16

Figura 55. Eje del tambor de arrollamiento diseñado



Eje de la polea intermedia para transmisión de potencia

Para llevar a cabo el diseño de este elemento se sigue el mismo procedimiento realizado para el cálculo del eje del tambor de arrollamiento.

Diseño preliminar del eje:

D_A = diámetro de la polea pequeña

D_B = diámetro de rodamiento 1

D_C = diámetro de polea grande

D_D = diámetro de rodamiento 2

Figura 56. Diámetros a calcular en el eje de la polea intermedia para transmisión de potencia

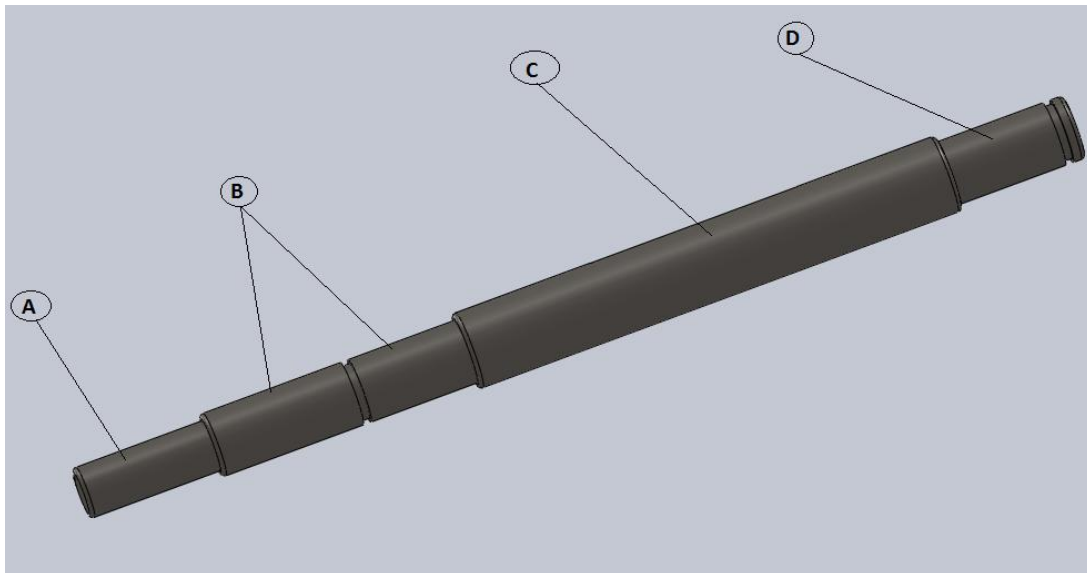
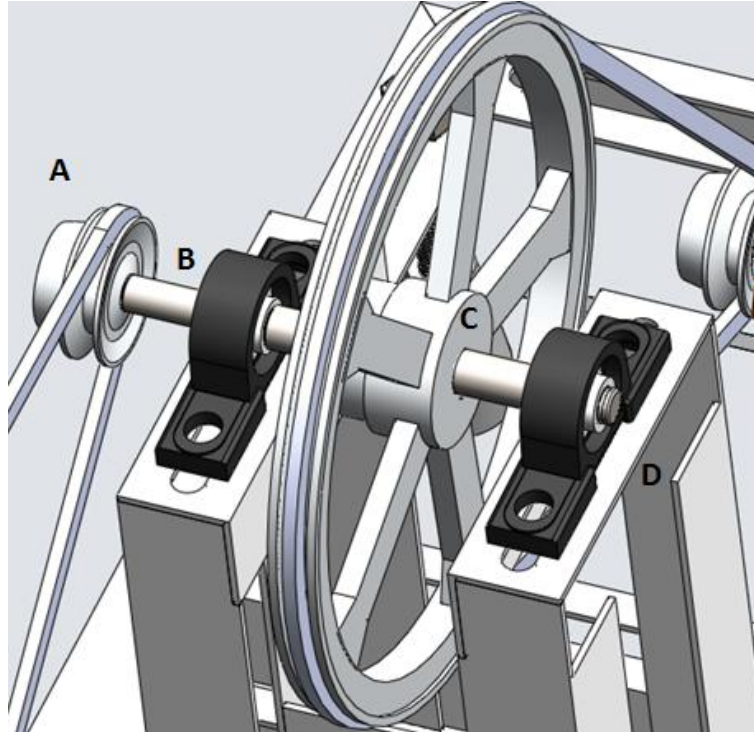


Figura 57. Disposición de elementos sobre el eje de la polea intermedia



Variables definidas para este eje.

P_T = potencia recibida de la transmisión

$$P_T = 0,6 H_p$$

n_e = velocidad del eje en Rpm

$$n_e = 375 \text{ rpm}$$

Tipo de acero:

Acero Aisi 1045 estirado en frio

S_y = resistencia a la fluencia

$$S_y = 84000 \text{ Psi} \quad [\text{tabla A6. Diseño de Mott}]$$

S_u = resistencia a la tensión o ultima

$$S_u = 100000 \text{ Psi}$$

S_n = resistencia a la fatiga

$$S_n = 56000 \text{ Psi} \quad [\text{figura 5.8 Diseño de Mott}]$$

Se definen los factores para la seguridad

- Confiabilidad----- $C_R = 0,90$ [tabla 5.1 Diseño de Mott]
- Factor de material----- $C_m = 1,00$ en aceros forjados
- Factor por tamaño para un diámetro aproximado = 1 pulg --- $C_S = 0,88$
[tabla 5.9 Diseño de Mott]
- Factor de tipo de esfuerzo : ----- $C_{St} = 1,00$ para esfuerzos flexionantes
- Resistencia modificada a la fatiga:

$$S_n' = S_n * C_S * C_R * C_m * C_{St}$$

$$S_n' = 56000 \text{ Psi} * 0.88 * 0.90$$

$$S_n' = 44352 \text{ Psi}$$

- Factor de Diseño:

$N = 2,0$ → valor seleccionado para este caso

- Determinación de cargas:

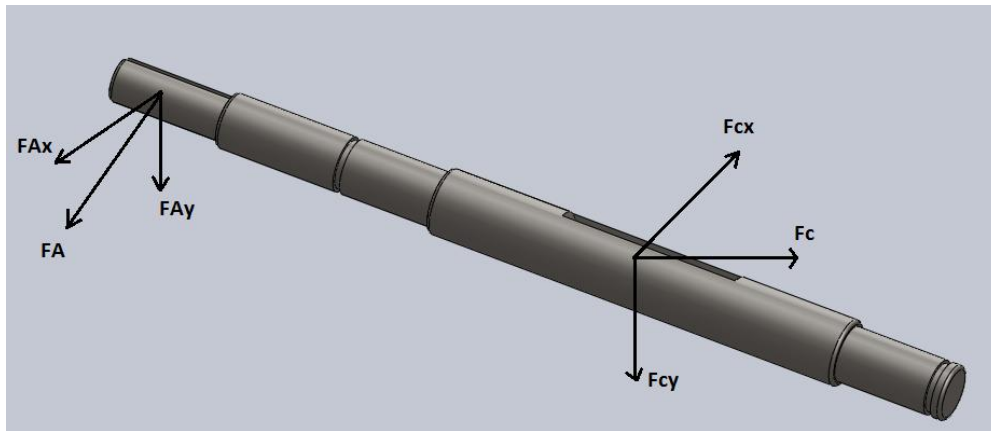
$$F_A = 139,654 \text{ Lb}$$

$$F_{Ax} = F_A \cos\theta \rightarrow F_{Ax} = 139,654 \cos 45^\circ \rightarrow F_{Ax} = 98,75 \text{ Lb}$$

$$F_{Ay} = F_A \sin\theta \rightarrow F_{Ay} = 139,654 \sin 45^\circ \rightarrow F_{Ay} = 98,75 \text{ Lb}$$

Esta fuerza es la misma en magnitud que se encuentra en el eje del tambor de arrollamiento, en la posición de la polea.

Figura 58. Fuerzas de las poleas A y C sobre el eje intermedio



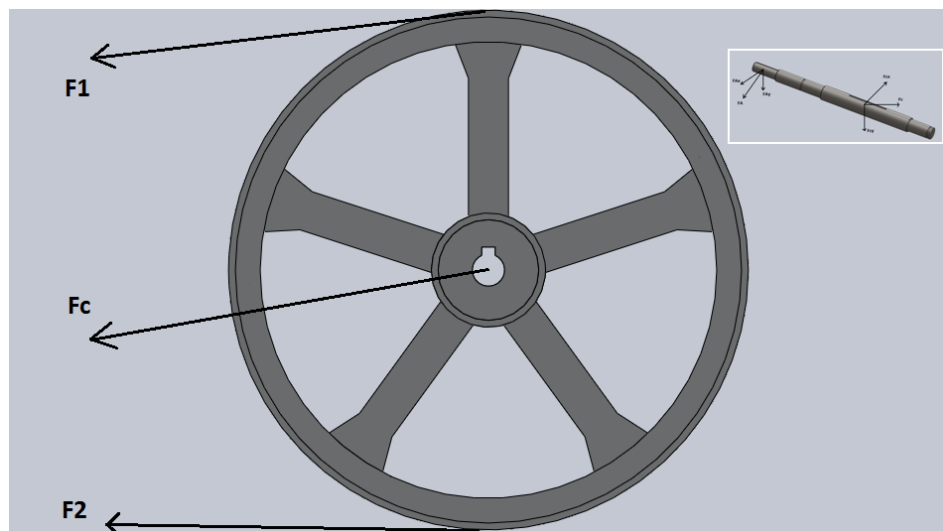
- Fuerzas transmitidas al eje:

$$T_C = \frac{63000 * P_T}{n_e} \text{ [Lb * pulg]}$$

$$T_C = \frac{63000 * 0,6H_p}{375 \text{ rpm}} \rightarrow T_C = 100,8 \text{ Lb * pulg.}$$

$$T_C = 116,136 \text{ Lb * pulg}$$

Figura 59. Fuerzas sobre la polea C



F_N = Fuerza impulsadora neta

$$F_N = \frac{T_C}{D_C/2}$$

F_C = fuerza flexionante sobre el eje

$$F_C = 1,5 F_N$$

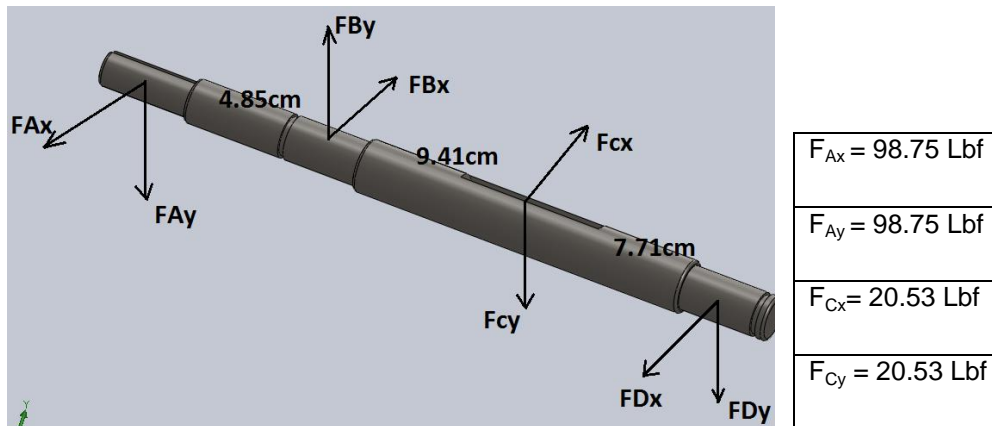
$$F_C = 1,5 \frac{T_C}{D_C/2} \rightarrow F_C = 1,5 \frac{[116,136] \text{Lb} \cdot \text{pulg}}{12 \text{pulg} / 2} \rightarrow F_C = 29,034 \text{ Lb}$$

$$F_{Cx} = F_C \cos \theta \rightarrow F_{Cx} = 29,034 \cos 45^\circ \rightarrow F_{Cx} = 20,53 \text{ Lb}$$

$$F_{Cy} = F_C \sin \theta \rightarrow F_{Cy} = 29,034 \sin 45^\circ \rightarrow F_{Cy} = 20,53 \text{ Lb}$$

La distribución general de fuerzas sobre este eje se puede ver en la siguiente figura.

Figura 60. Distribución general de fuerzas sobre el eje de la polea intermedia



Plano Y-Z

$$\sum M_B = 0$$

$$F_{Dy} * 17,12 = - F_{Cy} * 9.41 + F_{Ay} * 4,85$$

$$F_{Dy} = [-20.53 * 9.41 + 98.75 * 4,85] * 1/17.12$$

$$F_{Dy} = 16.7 \text{ Lbf}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{Ay} + F_{Cy} + F_{Dy} = F_{By}$$

$$F_{By} = 98.75 + 20.53 + 16.7$$

$$F_{By} = 135.98 \text{ Lbf}$$

Plano X-Z

$$\sum M_B = 0$$

$$F_{Dx} * 17,12 = F_{Cx} * 9.41 + F_{Ax} * 4,85$$

$$F_{Dx} = [20.53 * 9.41 + 98.75 * 4,85] * 1/17.12$$

$$F_{Dx} = 39.26 \text{ Lbf}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{Ax} - F_{Cx} + F_{Dx} = F_{Bx}$$

$$F_{Bx} = 98.75 + 39.26 - 20.53$$

$$F_{Bx} = 117.48 \text{ Lbf}$$

Los diagramas de carga, esfuerzo cortante, momento resultante y torque sobre el eje intermedio se pueden apreciar en las siguientes figuras.

Figura 61. Diagramas correspondientes al plano Y – Z

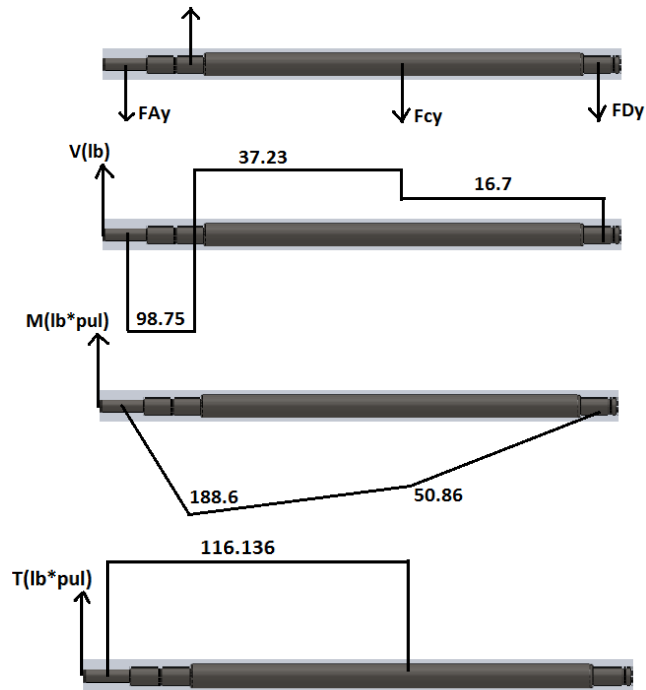
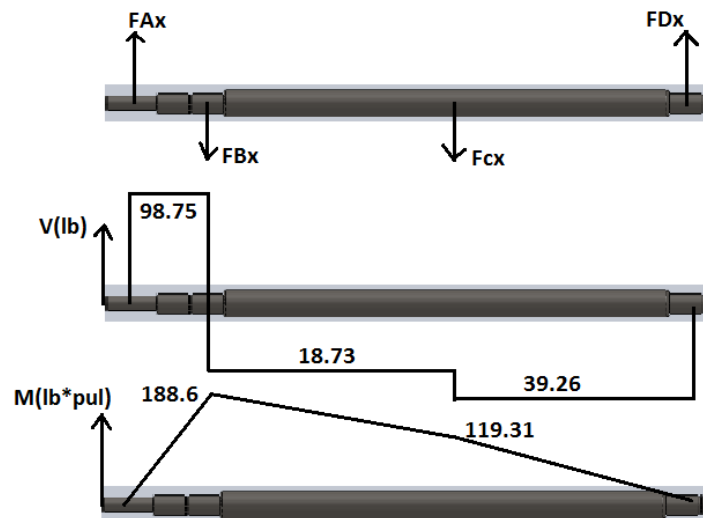


Figura 62. Diagramas correspondientes al plano X – Z



Se determina el valor de los diámetros mínimos aceptables para el eje

$$M_B = \sqrt{(188,6)^2 + (188,6)^2} \rightarrow M_B = 266,72 \text{ Lb*Pulg.}$$

$$M_C = \sqrt{(50,86)^2 + (119,31)^2} \rightarrow M_C = 129,72 \text{ Lb*Pulg.}$$

$$T = 116,136 \text{ Lb*Pulg.}$$

$$V_D = \sqrt{(16,7)^2 + (39,26)^2} \rightarrow V_E = 42,66 \text{ Lb*Pulg.}$$

Punto A

$$D_A = \left[\frac{32 \times N}{\pi} \sqrt{+ \frac{3}{4} \left(\frac{T_A}{S_g} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \rightarrow D_A = \left[\frac{32 \times 2}{\pi} \sqrt{+ \frac{3}{4} \left(\frac{116,136}{84000} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_A = 0,29 \text{ Pulg}$$

Aumentaremos un 6% del valor de (D_A) debido a la cuña que se le realiza

$$D_A = \mathbf{0.307} \text{ Pulg}$$

Punto B

Anillo de retención $k_t = 2 \rightarrow$ Factor por detalles

$$D_B = \left[\frac{32 \times N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t \cdot M_B}{S_n'} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T_B}{S_g} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \rightarrow D_B = \left[\frac{32 \times 2}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 266,72}{44352} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{116,136}{84000} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_B = 0,627 \text{ Pulg}$$

Se debe aumentar un 3% del valor de D_B para complementar el material retirado en el anillo de retención.

$$D_B = \mathbf{0.646} \text{ Pulg}$$

Punto C

Perfil de cuñeros $K_t = 2 \rightarrow$ Factor por detalles

$$D_C = \left[\frac{32 \times N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t \cdot M_C}{S_{n'}} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T_C}{S_g} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \rightarrow D_C = \left[\frac{32 \times 2}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 129,7}{44352} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{116,136}{84000} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_C = 0.495 \text{ Pulg}$$

Se debe aumentar un 6% del valor de D_C debido material retirado por la cuña

$$D_C = \mathbf{0.525 \text{ Pulg}}$$

Punto D

Factor de corrección $k_t = 2$ por anillo de retención

$$D_D = \sqrt{\left(2,94 K_t \cdot V_D \cdot \frac{N}{S_{n'}} \right)} \rightarrow D_D = \sqrt{\left(2,94(2) \cdot 42,66 \cdot \frac{2}{44352} \right)}$$

$$D_D = 0.16 \text{ Pulg}$$

Se debe aumentar el 3% del valor inicial determinado para D_D debido al material retirado por el anillo retenedor

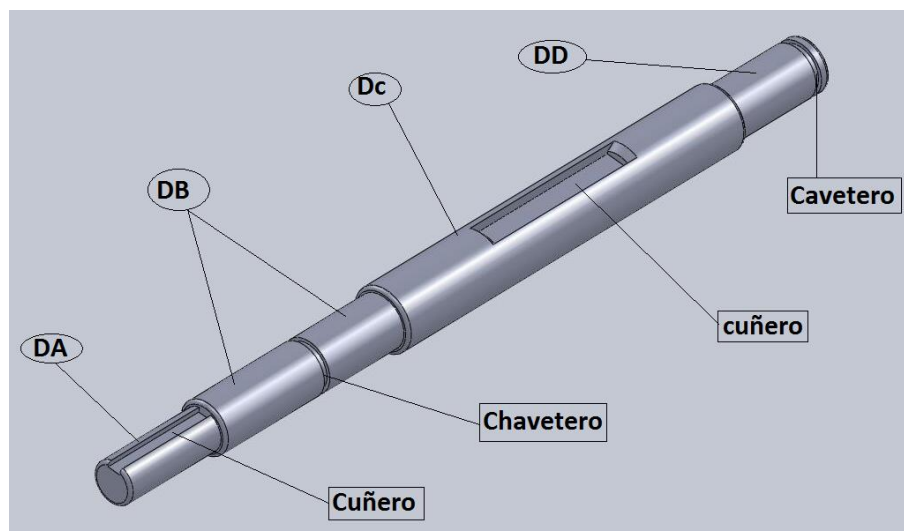
$$D_D = \mathbf{0.1095 \text{ Pulg}}$$

De esta manera quedan seleccionados los valores de los diámetros en los cuales se mecanizará el eje de la polea intermedia para transmisión de potencia, los cuales se listan en la siguiente tabla.

Tabla 16. Diámetros mínimos establecidos para el eje intermedio

Sección	$D_{\text{mínimos}}$	$D_{\text{seleccionado}}$
D_A	0.307 pulg	1/2 pulg
D_B	0.646 pulg	5/8 pulg
D_C	0.525 pulg	3/4 pulg
D_D	0.1095 pulg	5/8 pulg
Chavetero B	5/8	5/8
Chavetero D	5/8	5/8
Cuñero A	a x b	a x b
	3/16	3/16
Cuñero C	a x b	a x b
	1/4	1/4

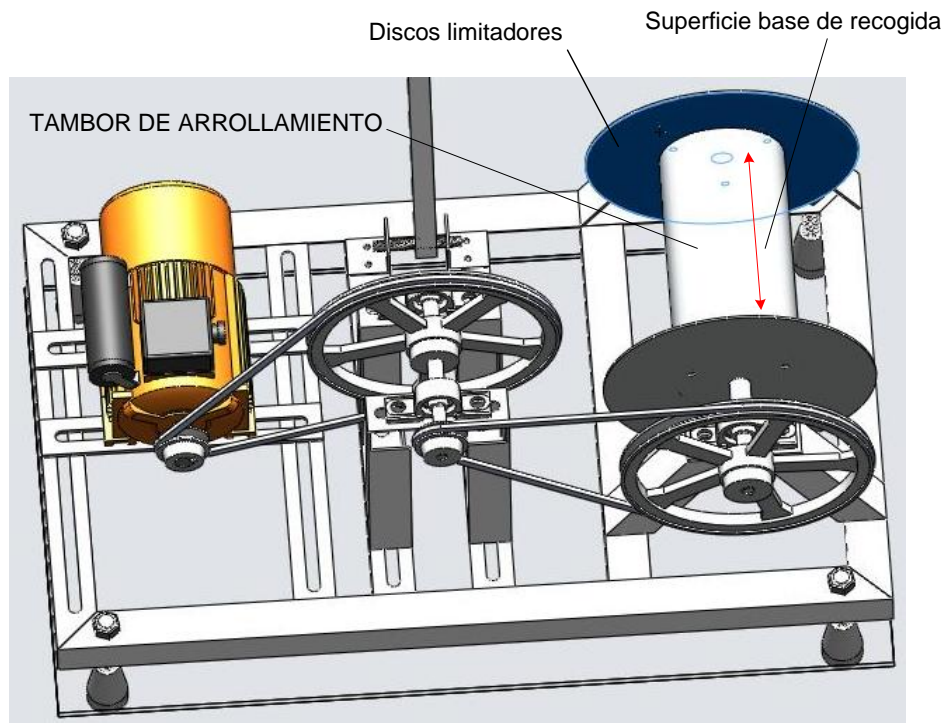
Figura 63. Eje de la polea intermedia para transmisión de potencia diseñado



3.1.1.5 Tambor de arrollamiento

Este componente se encuentra encargado de relacionar el tiro del cable de elevación con el momento torsional suministrado por el motor eléctrico; en este se recoge circunferencialmente la línea durante la carrera de ascenso y se entrega con giro en sentido contrario al anterior para el descenso.

Figura 64. Tambor de arrollamiento en componente motriz

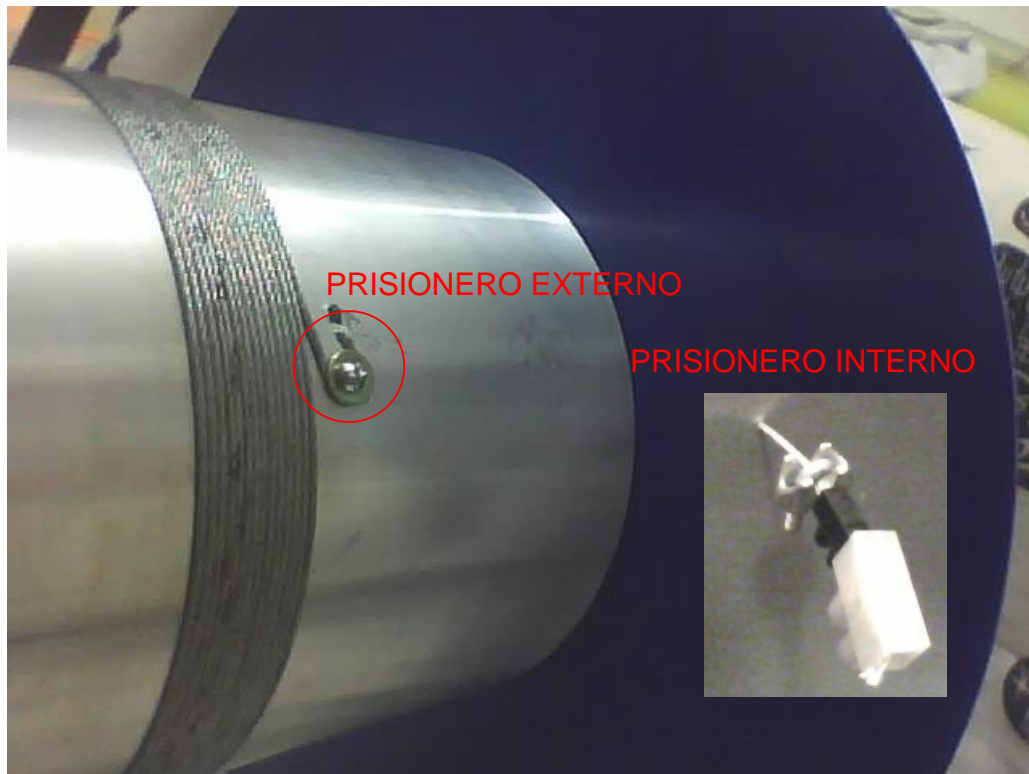


Su diseño consiste en un cilindro base de diámetro exterior igual a **6** pulgadas (**15.24cm**) valor que ha sido asignado en razón a que esta es la mínima curvatura en la cual se debe arrollar un cable metálico del tipo

seleccionado en el capítulo 3.1.1.1 para evitar una falla prematura por efecto de *fatiga*.

Sobre dicho cilindro es estrictamente asegurado uno de los extremo de los 1000 metros de cable empleado para la extracción, el cual se recoge sobre toda la longitud de este primero, limitado por dos discos o platos metálicos.

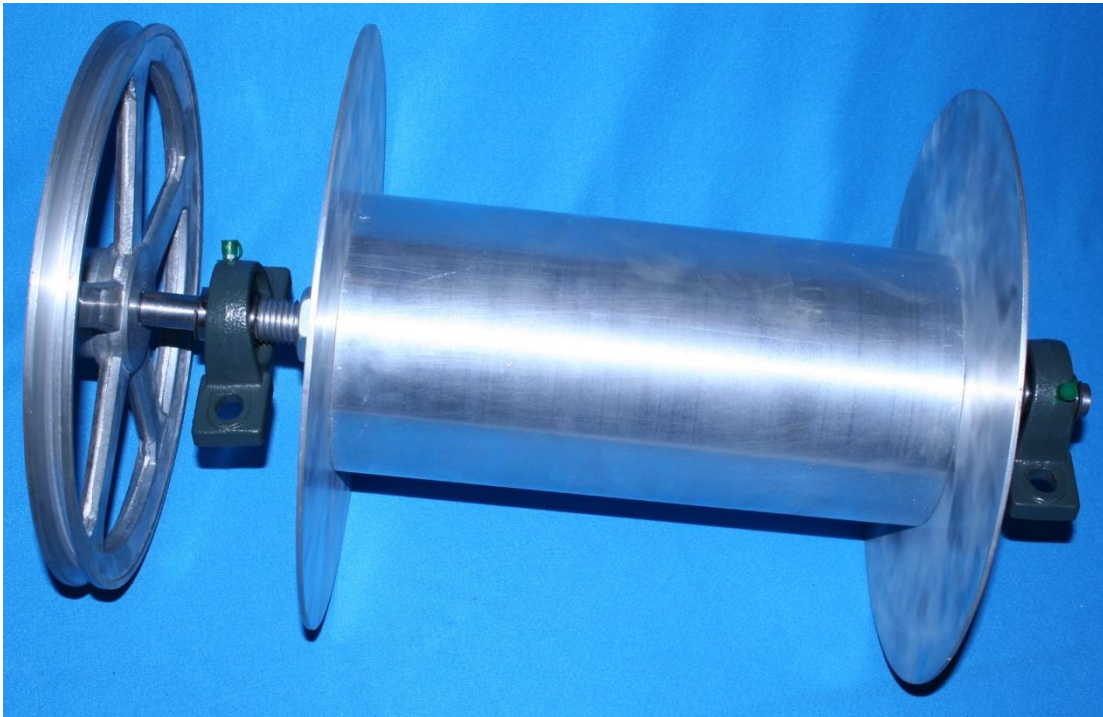
Figura 65. Aseguramiento interno y externo del cable al tambor



La fabricación de este componente (cilindro base-discos externos) es llevada a cabo en su totalidad en Aluminio por las razones expuestas a continuación:

- Este metal ofrece gran resistencia mecánica y baja densidad (liviano), que reduce sustancialmente los valores de inercia rotacional requeridos para mover este elemento; lo cual se traduce en menor consumo de potencia.
- Posee alta tolerancia a la humedad ambiental, lo cual previene la formación de óxido o corrosión al encontrarse expuesto a la interperie.
- El material es fácilmente mecanizable, lo que facilita los procesos de fabricación del mismo.

Figura 66. Tambor de arrollamiento construido



Además de las cualidades expuestas anteriormente cabe resaltar que este elemento maneja un nivel de seguridad calculado para la protección tanto del equipo como del pozo; al funcionar mediante un torque de operación transmitido por fricción entre el eje roscado sobre el cual éste rota y los discos externos que aprisionan el cilindro base como se puede ver en la figura 67.

De esta manera ante una eventual situación de emergencia como la que podría ser generada por un atascamiento o enredo de la línea al interior del pozo, el tambor de arrollamiento limitaría la tensión transmitida al cable, al generarse un torque por fricción menor que el torque por carga; de este modo el esfuerzo en la línea no alcanza un valor de riesgo que conlleve una falla por rotura, que desencadene una situación de pérdida del colector al interior del casing.

Figura 67. Torque transmitido por fricción



Por último es llevado a cabo el análisis de esfuerzos y deformaciones de la pieza más crítica de este componente (cilindro base); para ello se sugiere una carga distribuida circunferencialmente generada por el peso de los 1000 metros de cable arrollado, así como por la tensión generada.

De este estudio se observa el comportamiento esperado, en el cual se tiene la máxima desviación en el punto medio o zona central del cilindro, con un valor de 0.00034 mm. El cual es insignificante para su funcionamiento y garantiza la ausencia de vibraciones considerables.

Figura 68. Estado de esfuerzos en el cilindro base del tambor

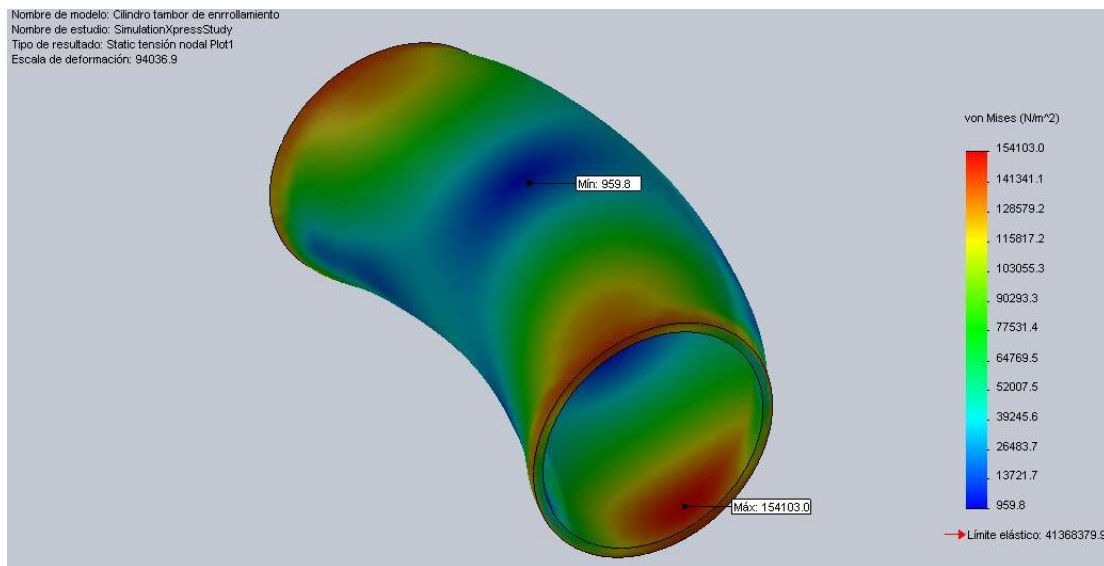
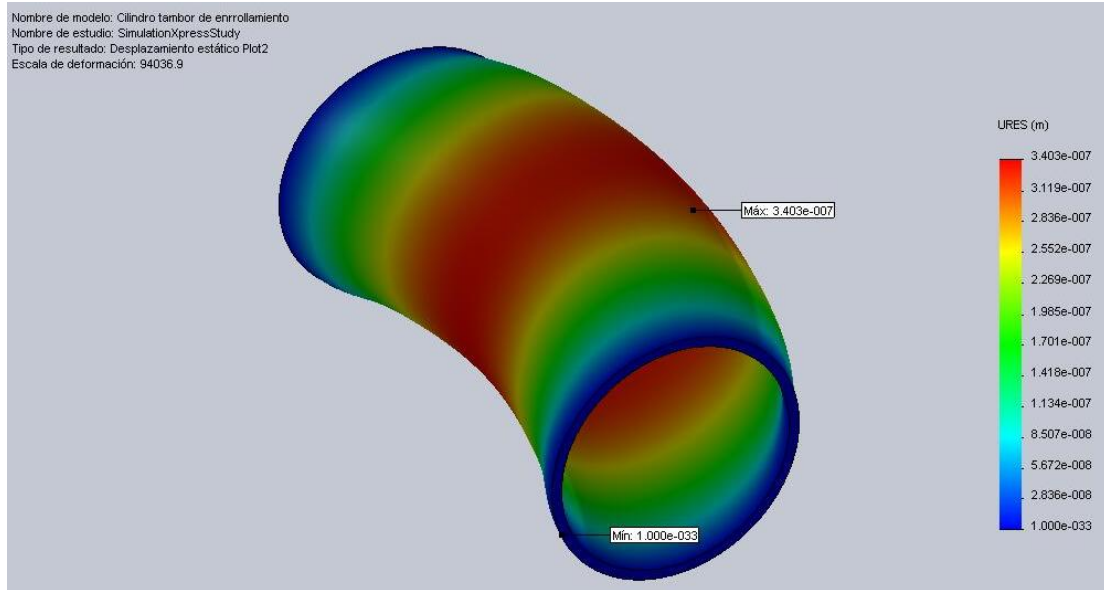


Figura 69. Deformaciones elásticas en el cilindro base bajo carga



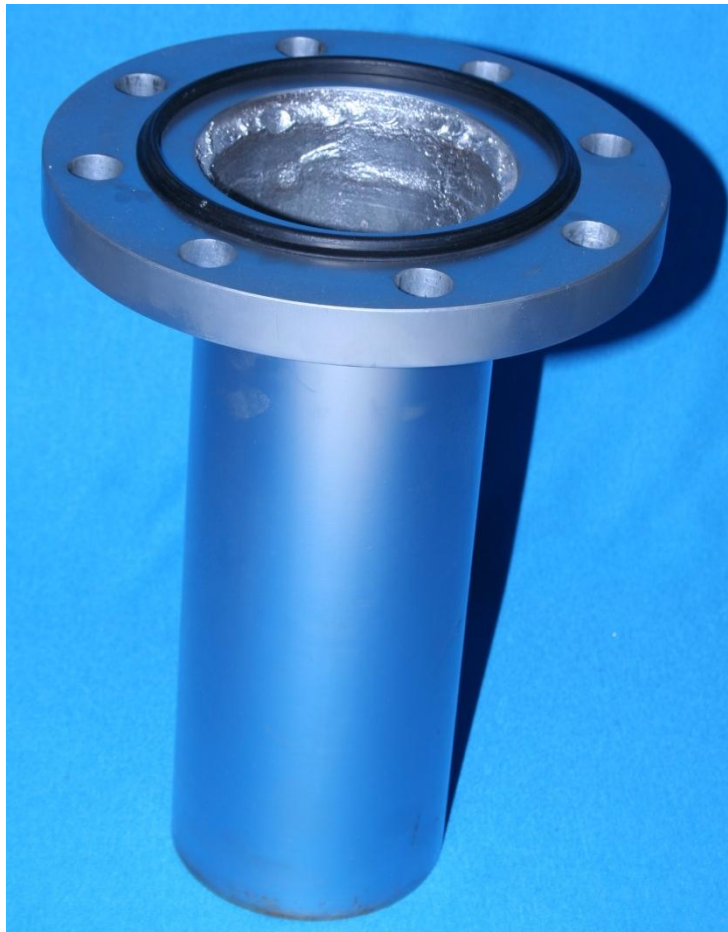
3.1.1.6 Cilindro base bridado

Este es el primer componente en montaje que encontramos en el equipo, acopla todo el sistema con la toma u orificio superior de la tubería de producción del yacimiento, permitiendo así establecer una unión fija y estable de tipo roscada (no permanente) con la boca del pozo y la válvula de seguridad inmediatamente superior.

Tiene una geometría cilíndrica, calculada en base al diámetro interno del ducto en tierra (4") y es elaborado en material metálico (acero AISI 1045), en razón a las pesadas condiciones de trabajo a las cuales se ve expuesto,

tales como rozamiento, leves impactos, sustancia con la cual entra en contacto, entre otras.

Figura 70. Cilindro base bridado de acople



Además permite ser un muy buen punto de polo a tierra, para descargar eventuales cargas electrostáticas que potencialmente pueden desencadenar una situación de emergencia como un incendio u explosión. Esto es posible dada la ubicación inicial de este elemento en la secuencia del proceso

(conexión directa a una larga tubería metálica bajo tierra) y la buena conducción eléctrica del material en el cual se encuentra elaborado.

El análisis de esfuerzos y deformaciones realizado a este elemento, se enfocó en la aplicación de una carga de compresión de alrededor de **90 kg-f** al encontrarse soportando el peso de los componentes situados encima de él, así como presión interna por parte del gas emanado del pozo; cuyo valor asignado fue de **300 psi**.

En ambas situaciones los esfuerzos y las deformaciones presentadas, no superaron el límite elástico del material, el cual muestra una resistencia muy por encima de la solicitada.

Figura 71. Estado de esfuerzos en brida base por carga y presión respectivamente

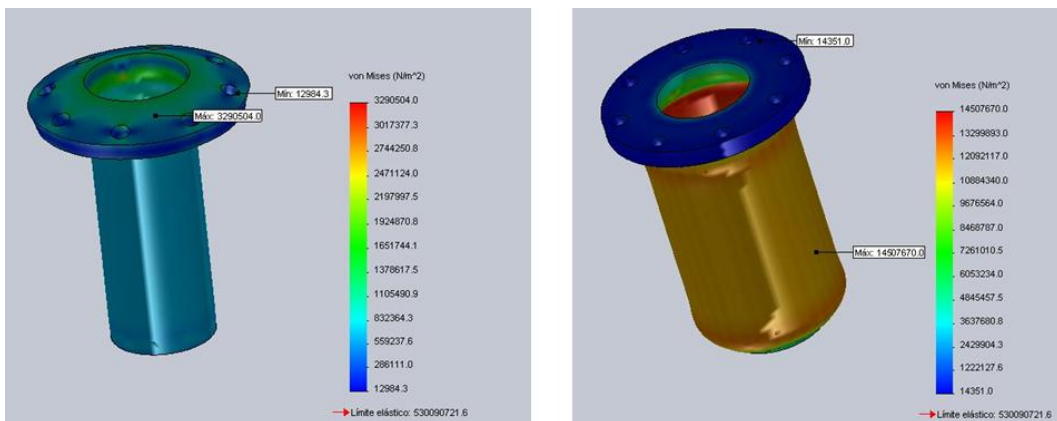
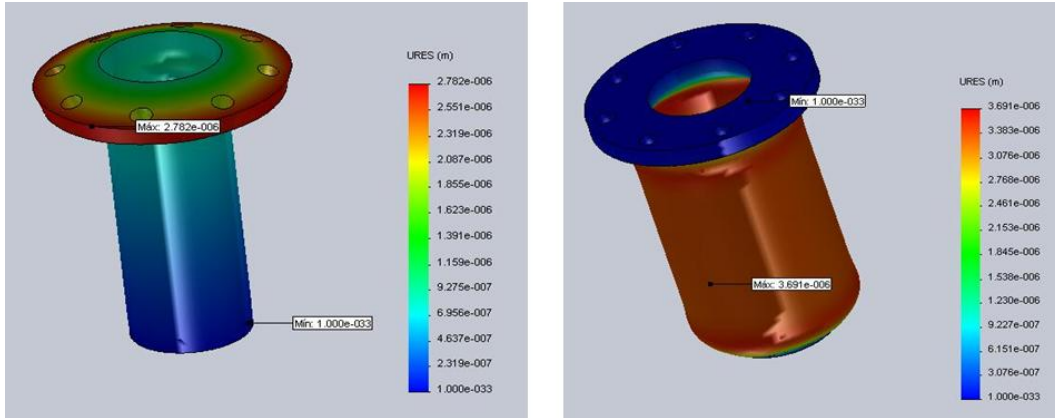


Figura 72. Deformaciones elásticas en brida base por carga y presión respectivamente

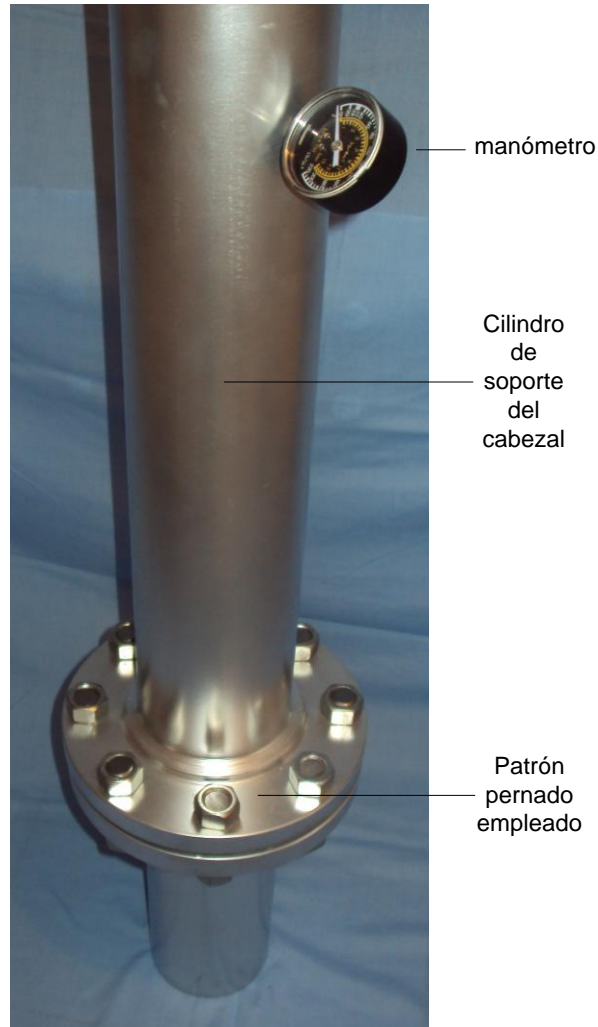


3.1.1.7 Cilindro soporte bridado

Elemento inmediatamente siguiente a la válvula de seguridad, que ajustándose mediante un patrón de 8 pernos de 3/4" en su base, permite el acople con el cabezal de direccionamiento por medio de una cupla de caucho. Su fabricación es también en acero AISI 1045 y su geometría de tipo cilíndrica, calculada con los valores desarrollados desde un principio para las dimensiones del pozo.

Este componente cuenta con un *manómetro* ubicado en la parte superior del mismo, el cual permite ver el valor de presión de gas que pueda llegar a ser considerable en un instante dado; para de esta manera realizar los procedimientos pertinentes a los que haya lugar.

Figura 73. Cilindro de soporte del cabezal construido



El análisis de esfuerzos contemplo una carga axial de compresión de aproximadamente **30 kg-f**; valor para el cual las deformaciones resultantes son del orden de **0.0104 mm**, valor insignificante que no afecta la configuración del sistema.

Figura 74. Estado de esfuerzos en el cilindro de soporte del cabezal

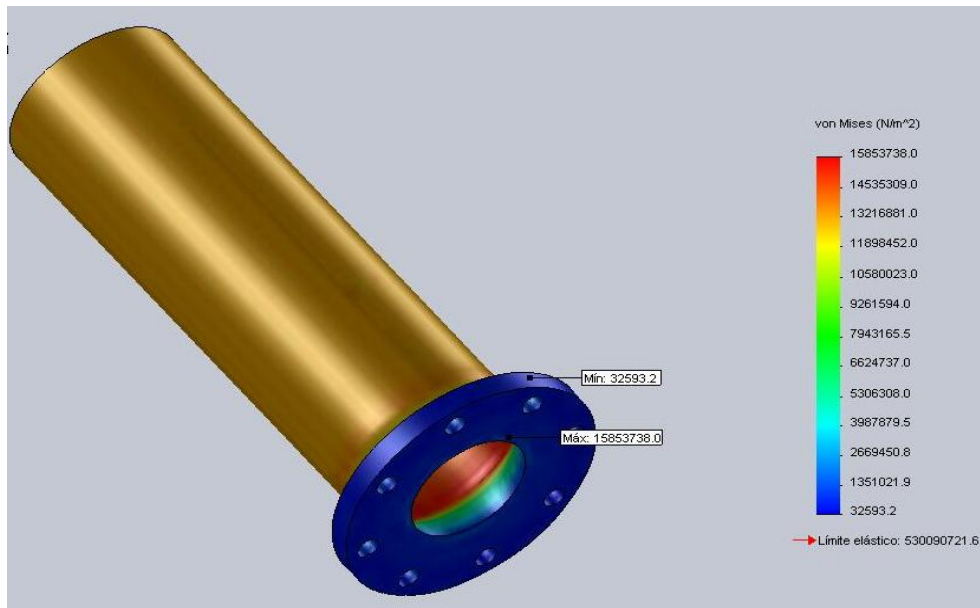
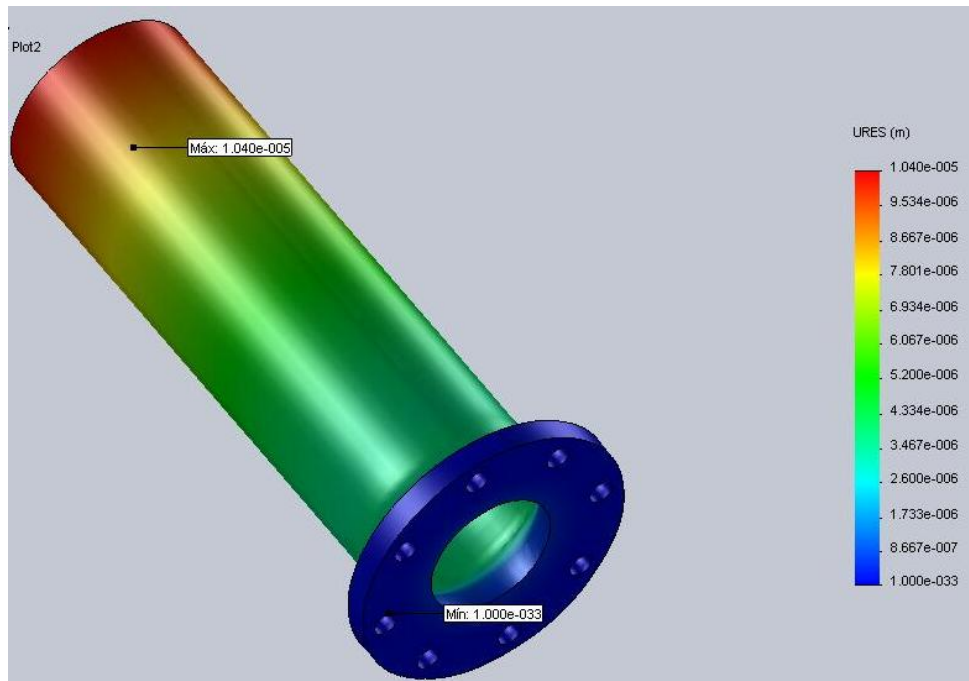


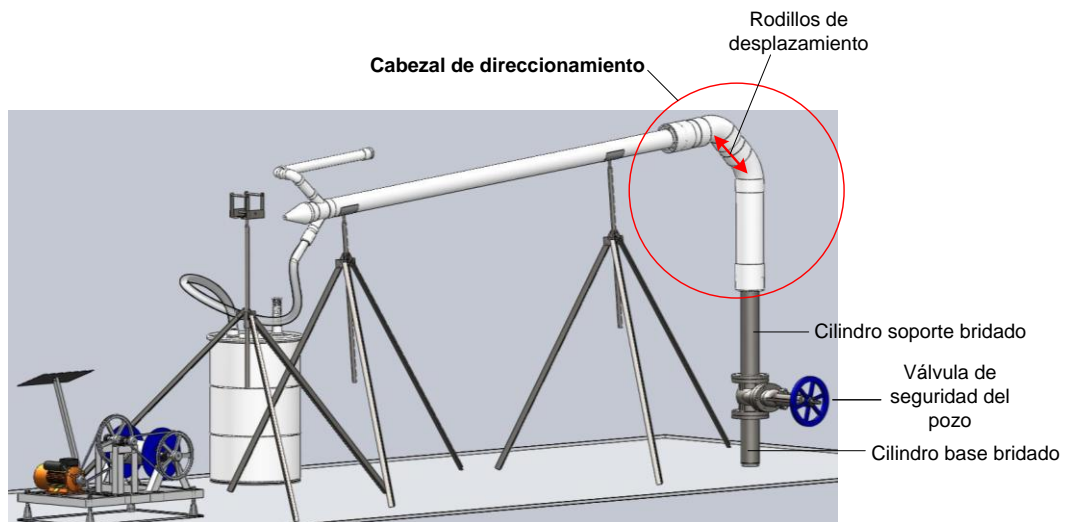
Figura 75. Deformaciones elásticas en el cilindro de soporte del cabezal



3.1.1.8 Cabezal de direccionamiento

Este componente que se encuentra inmediatamente ubicado encima del cilindro soporte bridado (final del tramo vertical del tubo guía), cumple básicamente la función de cambiar la orientación que sigue la manguera recolectora una vez llega a la superficie; pasando de una trayectoria vertical a una posición inclinada o semi-horizontal (en el cilindro de descarga) para llevar a cabo allí el desalajo del hidrocarburo recuperado.

Figura 76. Ubicación del cabezal de direccionamiento en el sistema



La fabricación de ésta parte del sistema, fue llevada a cabo en su totalidad haciendo uso de accesorios de Policloruro de vinilo o PVC de 6", en razón a lo siguiente:

- Baja densidad del material en que se encuentran elaborados los accesorios, lo cual disminuye notablemente el peso global del equipo,

facilitando así su transporte a la zona donde será puesto en operación.

- Alta resistencia mecánica por carga y presión.
- Permiten un ensamble ajustado, que garantizan la ausencia de fugas de gas.
- No reaccionan químicamente con la humedad del medio, ni con la sustancia de trabajo al no presentar corrosión por oxidación ni incrustación de los elementos que conduce.
- Larga vida útil

Figura 77. Accesorios utilizados en el montaje del cabezal de direccionamiento

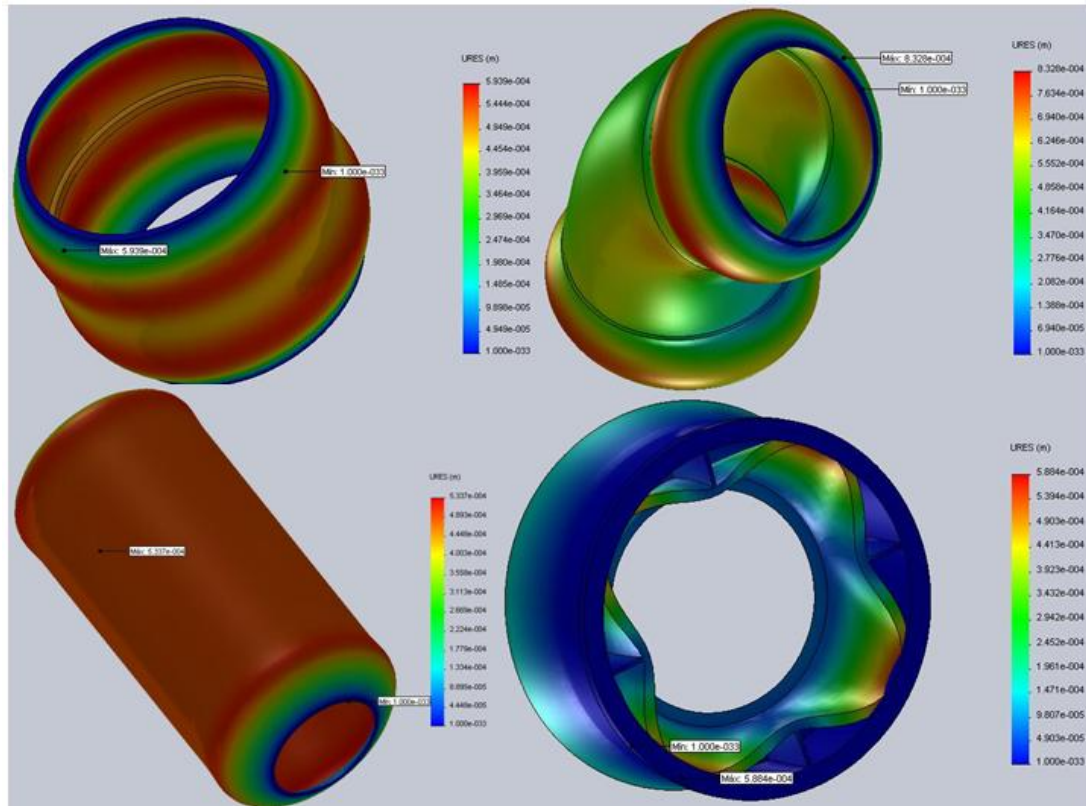


Figura 78. Cabezal de direccionamiento construido



El análisis de esfuerzos y deformaciones para este componente se realizó por presión interna, a un valor de **200** psi. Sin presentar falla de ningún tipo.

Figura 79. Estado de esfuerzos y deformaciones respectivas por presión en el cabezal de direccionamiento



3.1.1.9 Cilindro guía de descarga

Con una disposición semi-horizontal de **3** metros e inclinación de **6°**; constituye el elemento de mayor extensión de todo el sistema, y uno de los más sencillos en cuanto a la labor de guía, soporte y descarga del elemento recolector se refiere. Si bien su configuración es muy simple, al no ser más que un ducto en material de tipo PVC (**4"**), ofrece grandes ventajas tales

como su resistencia mecánica en relación a rigidez, relativa tenacidad, baja densidad por unidad de longitud (que colabora en la disminución de peso del equipo), buena resistencia química, facilidad en el procedimiento de montaje y un bajo costo.

El criterio de esfuerzos máximos permisibles para este elemento se estableció mediante la selección de la presión interna máxima sugerida por el fabricante correspondiente a **220** psi que se lista en la tabla 17. para el diámetro correspondiente.

Tabla 17. Especificaciones en tubería de PVC

Diam. Nominal (Pulg.)	Diametro Exterior		Diametro Interior		Espesor de pared		Presión a 23°C		Peso Aprox. Kg/m
	(pulg) (O.D)	(mm)	(pulg) (I.D)	(mm)	(pulg) (T)	(mm)	(PSI)	(Kg/cm ²)	
½"	0.840	21.3	0.609	15.5	0.109	2.8	600	42.0	0.24
¾"	1.050	26.7	0.810	20.6	0.113	2.9	480	33.6	0.32
1"	1.135	33.4	1.033	26.2	0.133	3.4	450	31.5	0.47
1 ¼"	1.660	42.2	1.363	34.6	0.140	3.6	370	25.9	0.63
1 ½"	1.900	48.3	1.593	40.5	0.145	3.7	330	23.1	0.76
2"	2.375	60.3	2.049	52.0	0.154	3.9	280	19.6	1.01
2 ½"	2.875	73.0	2.455	62.1	0.023	5.2	300	21.0	1.60
3"	3.500	88.9	3.042	77.3	0.216	5.5	260	18.2	2.10
4"	4.500	114.3	3.989	101.5	0.237	6.0	220	15.4	2.98
6"	6.625	168.3	6.031	153.2	0.280	7.1	180	12.6	5.26
8"	8.625	219.1	7.942	201.7	0.322	8.2	160	11.2	7.89
10"	10.750	273.1	9.976	253.4	0.365	9.3	140	9.8	11.20
12"	12.750	323.9	11.889	302.0	0.406	10.3	130	9.1	14.80
14"	14.000	355.6	13.073	332.1	0.437	11.1	130	9.1	17.56
16"	16.000	406.4	14.940	379.5	0.500	12.7	130	9.1	22.93
18"	18.000	457.2	16.809	426.9	0.562	14.3	130	9.1	29.91
20"	20.000	508.0	18.743	476.1	0.593	15.1	120	8.4	35.13
24"	24.000	609.6	25.544	572.6	0.687	17.4	120	8.4	48.89

Fuente: catalogo de productos en PVC de industrias PAVCO

Este componente se encuentra sostenido por un par de soportes de perfil metálico con disposición en trípode y es limitado en su extremo final por una Y de derivación; permitiendo así el descanso temporal al interior del mismo

del elemento colector mientras éste vacía el crudo recuperado enfrentando su cara abierta hacia una zona cerrada por un cono limitador que se explicará más adelante; su ubicación en el sistema la podemos ver en el esquema de componentes que se muestra en la página 46 de este libro.

Figura 80. Cilindro guía de descarga implementado



3.1.1.10 Cono limitador

Este elemento multifuncional es básico al sistema, en tanto que recibe, retiene y dirige el crudo desalojado por la manguera colectoras en el interior del tubo guía inclinado hacia el tanque de almacenamiento; se encuentra

elaborado con diversos accesorios de PVC y está ubicado al final del cilindro de descarga desempeñando otras dos funciones, como lo son:

- Sello hermético del orificio a través del cual se desplaza el cable de elevación
- Descarte rápido, seguro y efectivo del gas con el que viene acompañado el crudo extraído.

Figura 81. Funciones del cono limitador

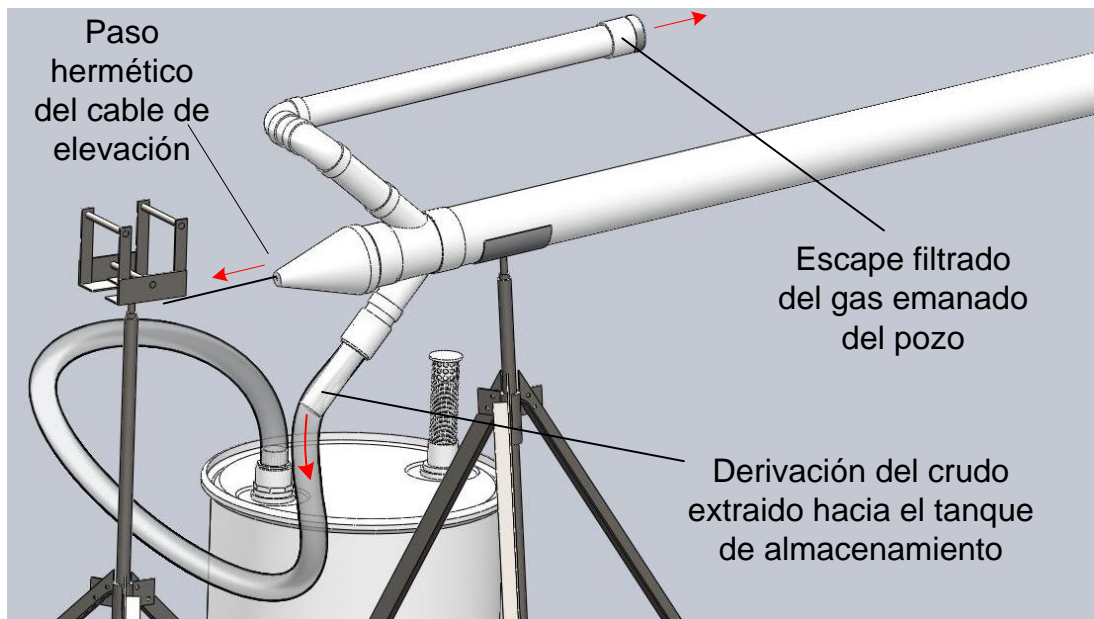


Figura 82. Cono limitador construido



3.1.1.11 Colector flexible de recuperación

Este elemento representa la producción del sistema, al ser el encargado de descender por la extensa tubería de producción y cumplir con la recuperación de hidrocarburo, llenando su interior de este último para posteriormente ascender y descargar su contenido; su diámetro y su longitud están supeditadas a la capacidad de extracción que por diseño se estableció en un principio, definida en **6.8** litros de crudo por ciclo de operación; este valor corresponde a un diámetro de dicho contenedor igual a **0.054m** (2" comerciales) y una longitud de **3** metros.

$$Vol\ extraido = \frac{\pi di^2}{4} \times h = \frac{\pi * 0.054^2}{4} \times 3 = 6.87 \times 10^{-3} m^3$$

En el capítulo 7 sección 7.1 se analiza el consumo de potencia eléctrica en el cual se incurre para llevar a cabo la extracción del volumen anteriormente determinado, el cual ha sido calculado en este valor específico para ser rentable la operación.

De manera lógica este recolector flexible (serie LD 200) tiene forma cilíndrica concordante con los demás elementos a través de los cuales viaja, puesto que así se consigue desplazar un valor máximo de volumen por unidad de longitud, que lo que se obtendría con otro tipo de configuración (esférica, cuadrada, espiral, etc.). Este se encuentra limitado en su extremo inferior por un terminal cerrado que agarra un contrapeso de sumergencia, y otro abierto en su extremo superior que engancha al cable de elevación.

Además de lo anteriormente mencionado, cuenta con un recubrimiento en fibra flexible de alta resistencia, que le otorga protección ante las drásticas condiciones de trabajo que involucran roce permanente y curvamiento periódico; ofreciendo resistencia hasta una capacidad de **65** psi de presión.

Figura 83. Colector flexible de recuperación implementado



3.1.1.12 Contrapeso de sumergencia

El estudio de los fluidos permite identificar a las fuerzas de empuje que recibe un cuerpo cuando este ingresa dentro de los dominios del primero; siendo el hidrocarburo una sustancia que involucra a la fase líquida, y que contiene gran número de partículas diversas como sales, arenas y lodos que otorgan variados niveles de densidad, es razonable considerar la situación de inmersión completa que debe ejecutar la manguera colectora por debajo de la interfase gas-fluido. Por ello con el ánimo de garantizar un ingreso efectivo, se ha dotado al elemento colector de un cuerpo que ofrece un valor de contrapeso calculado en base a:

- Promedios de densidad del hidrocarburo en cuestión
- Volumen conocido de fluido desplazado
- Desequilibrio a generar para el reingreso del colector al pozo

Por requerir alto peso y mínimas dimensiones es elaborado en acero AISI 1045; y adopta una geometría que le permite ingresar con menor resistencia dentro de la zona fluida, así como versatilidad en su montaje para incorporar diferentes masas de acuerdo a los crudos en cuestión.

El cálculo de carga ejercida por esta pieza tuvo entonces dos criterios; el primero fue por el empuje a vencer al ingresar dentro del hidrocarburo; y el segundo por el desequilibrio que este último debe generar sobre el elemento colector cuando se encuentra descansando en el cilindro de descarga y debe re-ingresar al pozo. Los dos casos son desarrollados a continuación.

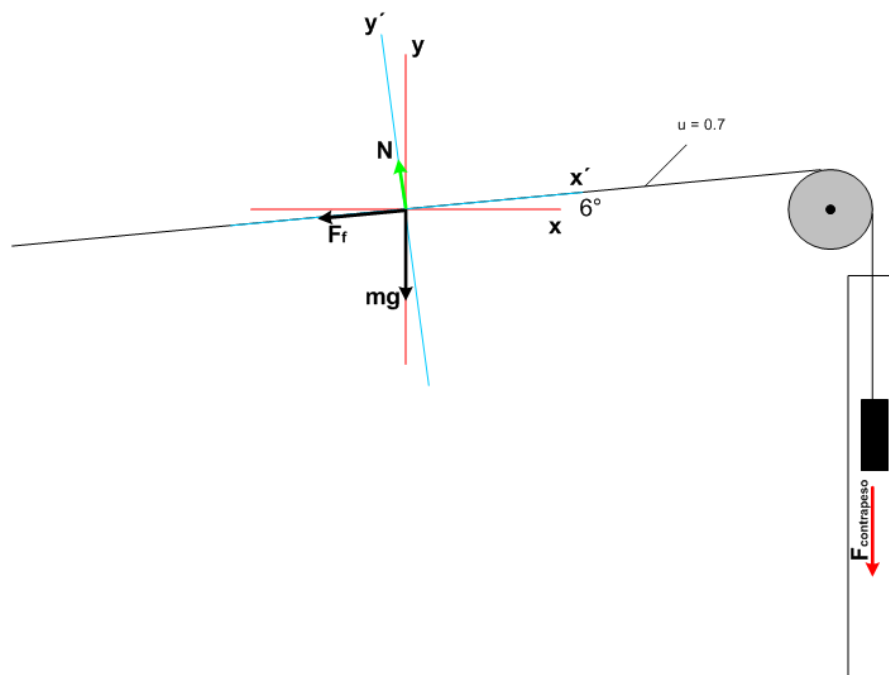
Contrapeso por empuje

$$F_{empuje} = \rho \times g \times V = \frac{900Kg}{m^3} \times \frac{9.8m}{s^2} \times 6.87E^{-3} = 60.6 N \approx \mathbf{6.05Kg - f}$$

Contrapeso por desequilibrio

El esquema de fuerzas para llevar a cabo este cálculo es mostrado en detalle en la siguiente figura.

Figura 84. Fuerzas presentes en el elemento flexible recolector durante la descarga



Determinamos las fuerzas presentes en cada eje de coordenadas

$$F_x = 0$$

$$F_y = -mg$$

$$F_{x'} = -F_f, F_{contrapeso}$$

$$F_{y'} = N$$

Despejamos $F_{contrapeso}$ del sistema insertado ($x'y'$)

$$\sum F_{x'} = -F_f - mg \sin 6^\circ + F_{contrapeso} = 0$$

$$\sum F_{y'} = N - mg \cos 6^\circ = 0$$

$$mg = 1.5 \times 9.8 = 14.7 \text{ Newtons}$$

$$mg \sin 6^\circ = 14.7 \times \sin 6^\circ = 1.53 \text{ Newtons}$$

$$mg \cos 6^\circ = 14.7 \times \cos 6^\circ = 14.61 \text{ Newtons}$$

$$N = mg \cos 6^\circ = 14.61 \text{ Newtons}$$

$$F_f = \mu \times N = 0.7 \times 14.61 = 10.23 \text{ Newtons}$$

$$F_{contrapeso} = F_f + mg \sin 6^\circ = 10.23 + 1.53 = 11.76 \text{ Newtons} \approx \mathbf{1.2Kg - f}$$

De estas dos situaciones podemos ver que el mayor requerimiento de carga se necesita para llevar a cabo la inmersión del elemento colector al interior del crudo; lo cual solicita una carga de **6 Kg-f**, implementados en el contrapeso diseñado.

Figura 85. Contrapeso de sumergencia construido



3.1.1.13 Tanque de almacenamiento

Consiste en un depósito temporal en el cual es alojado el crudo traído a la superficie; posee una capacidad de almacenamiento de **200** litros (55 galones) y se encuentra fabricado en material de tipo polímero, que lo protegen de factores ambientales y evitan alguna reacción química con la sustancia contenida en su interior.

Está dotado de un dispositivo de venteo, protegido por un filtro que evita el ingreso de cuerpos extraños tales como insectos, hojas de árbol o cualquier elemento solido circundante en el aire; así como de una conexión segura para la manguera de conducción de crudo recuperado proveniente del cono limitador. Además de lo ya mencionado implementa la simbología reglamentaria establecida por los códigos para tanques de almacenamiento de sustancias volátiles.

Figura 86. Tanque de almacenamiento implementado



3.1.1.14 Soportes de apoyo vertical (tripodes)

Estos consisten en un conjunto de elementos de perfilera metálica, tales como ángulos de 1 ¼" x 1/8", tornillos 5/16" y barras lisas de 1 ¼"; que se disponen en forma de trípodos y son ubicados en diferentes posiciones de los tramos largos y elevados del sistema, para de esta manera brindar soporte y estabilidad al mismo, así como permitir un fácil ensamble y desmontaje para llevar a cabo labores periódicas de control y de mantenimiento de la parte alta del equipo.

Figura 87. Soportes de apoyo construidos



Están conformados por un total de 3 conjuntos, dos de ellos de soporte y un tercero para apoyo y guía de la línea permitiendo direccionar el cable de elevación hacia el cono limitador para que este circule fácilmente con mínimas pérdidas por fricción, evitando cargar completamente la tensión sobre el extremo del cilindro de descarga.

El análisis de esfuerzos de estas partes del sistema se enfocó en las piezas más crítica de dichos componentes, correspondientes al cuello o guía vertical de cada trípode y las barra inclinadas de apoyo, en cuyo caso les fue asignada una carga axial de compresión de **20 Kg-f**, sin presentar esfuerzos considerables ni deformaciones permanentes.

Figura 88. Estado de esfuerzos y deformaciones respectivas en guía vertical

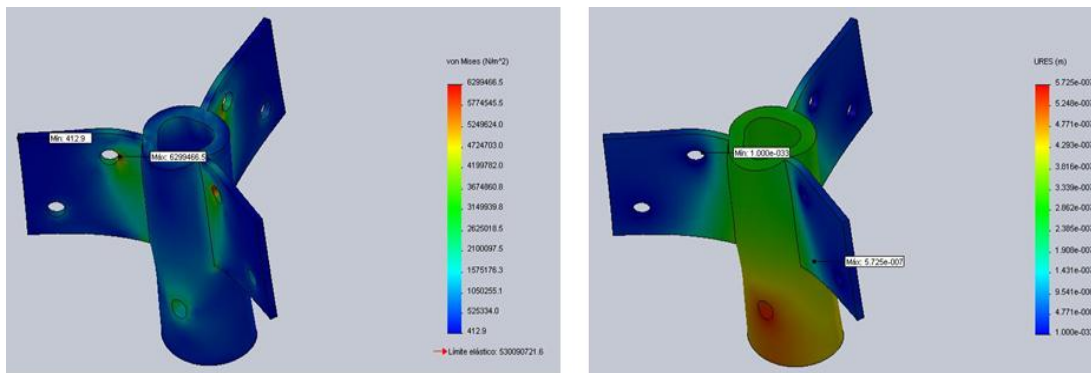
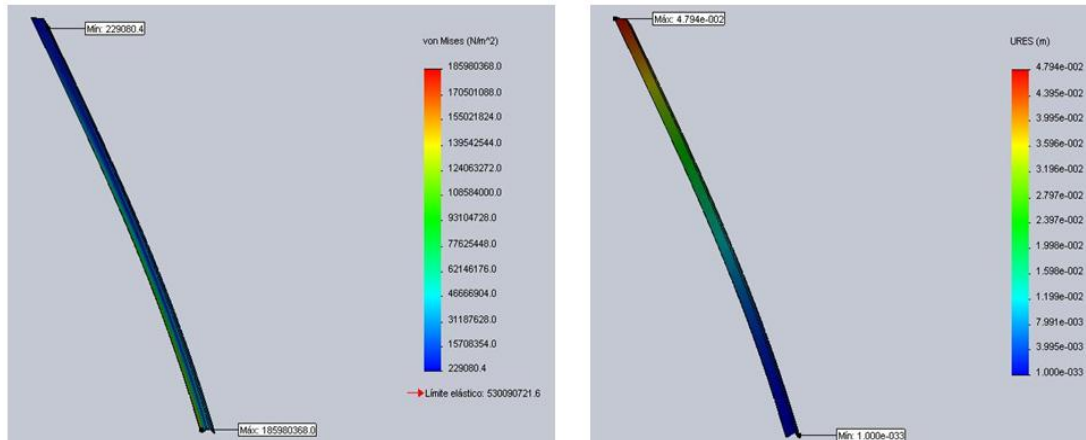


Figura 89. Estado de esfuerzos y deformaciones respectivas en barras inclinadas de apoyo

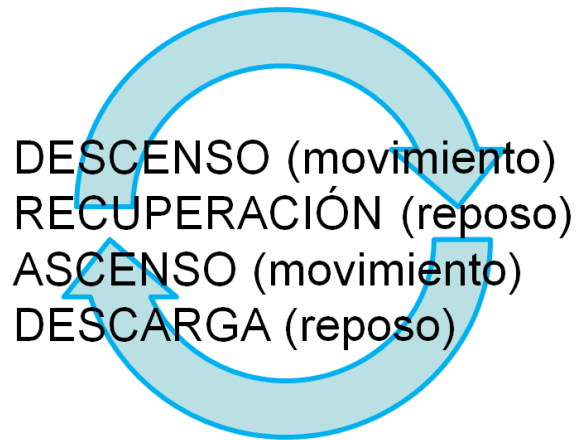


3.1.1.15 Sistema de control y potencia

El diseño de este componente es uno de los más importantes para el sistema de extracción, en tanto que cumple la función de coordinar las operaciones que ejecuta el primero de manera lógica y segura.

Para llevar a cabo la construcción de este subsistema, fue necesario identificar las actividades que el equipo realiza, es decir el proceso en sí; este se explica de forma detallada en el capítulo 5, sección 5.1. Sin embargo en este punto es conveniente dar a conocer las 4 etapas que son ejecutadas para conseguir la recuperación del crudo remanente, estas se listan en la figura 90.

Figura 90. Etapas del proceso de recuperación del crudo remanente



Como se puede notar son 4 estados, dos de los cuales implican movimiento del sistema, y dos una parada o reposo. Las etapas de actividad son realizadas durante los descensos (incrementando Δy) y ascensos (retornando al nivel cero), en tanto que las etapas de reposo suceden durante la recuperación a un determinado Δy de profundidad y durante la descarga nuevamente en el nivel cero, como puede ser observado en la figura 91.

La explicación anterior es necesaria para entender el esquema de elementos que han sido implementados en el tablero de control del equipo; pues la conexión eléctrica de los mismos busca ejecutar la operación ya mencionada de forma coherente y efectiva. En la figura 92. Se muestran los dispositivos escogidos para dicho propósito y se hace una explicación seguida de cada uno de ellos.

Figura 91. Esquema de la secuencia de trabajo por niveles de profundidad

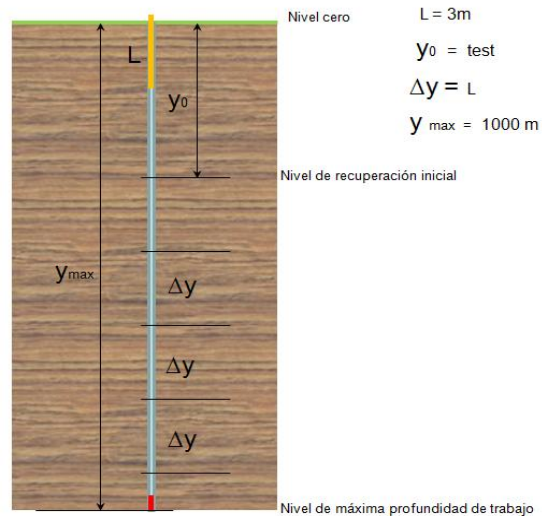
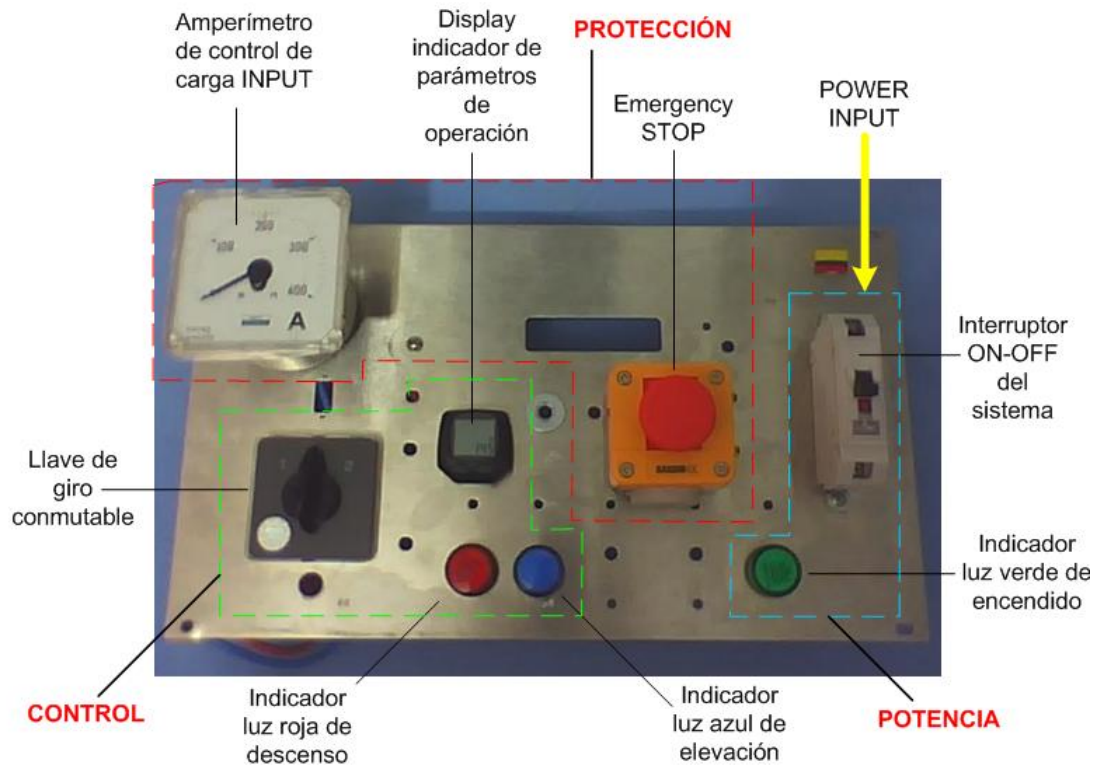


Figura 92. Tablero de control implementado en el sistema



Tablero de control

Se encuentra organizado en 3 módulos:

- PROTECCIÓN
- CONTROL
- POTENCIA

Los elementos constitutivos de cada uno de ellos y su función son presentadas a continuación.

Modulo de protección

- *Amperímetro de control de carga de entrada*: Permite visualizar la cantidad de corriente que circula hacia el sistema en un instante dado; si muestra fluctuaciones permanentes y en valores de riesgo para el sistema (superiores a los permisibles o por encima del rango normal de operación) sugiere apagar el equipo y esperar a que sean reestablecidas las condiciones seguras.
- *Emergency stop*: Este botón de parada de emergencia, protege tanto el equipo como el estado del pozo, al detener todo el proceso y la operación del sistema en un instante determinado bajo criterio del operario, por razones de mal funcionamiento de algún componente, comportamiento herrático de algún dispositivo, problemas de atascamiento de la línea o cualquier situación insegura que se presente.

Modulo de control

- *Llave de giro conmutable:* Permite establecer mediante tres posiciones, el sentido de giro que tiene el tambor de arrollamiento, de acuerdo a la etapa del proceso que se esté realizando (descenso, elevación o reposo); su manejo es manual y llevado a cabo por el operario bajo criterio propio en referencia a los parámetros de operación visualizados en el display. Su diagrama de conexión eléctrica es mostrado en la figura 93.

- *Indicadores luminosos:* Permiten visualizar el estado o la etapa del proceso indicando con luz **roja** el descenso y con luz **azul** la elevación del la carga recuperada. Su diagrama de conexión eléctrica es mostrado en el figura 94.

- *Display:* Pantalla que permite la visualización (una a la vez) de los siguientes parámetros de operación:
 - Velocidad lineal de la linea
 - Tiempo transcurrido de la etapa
 - Profundidad de recuperación
 - Odómetro
 - Velocidad máxima de la linea
 - AVS

Figura 93. Diagrama de conexión eléctrica de la llave de giro conmutable

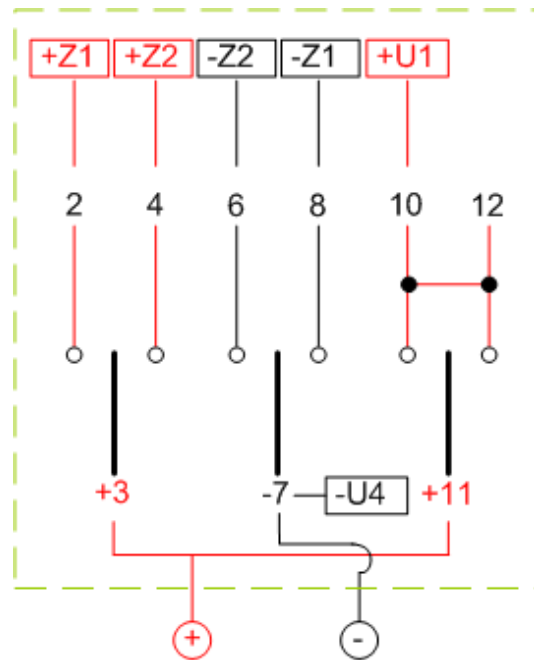
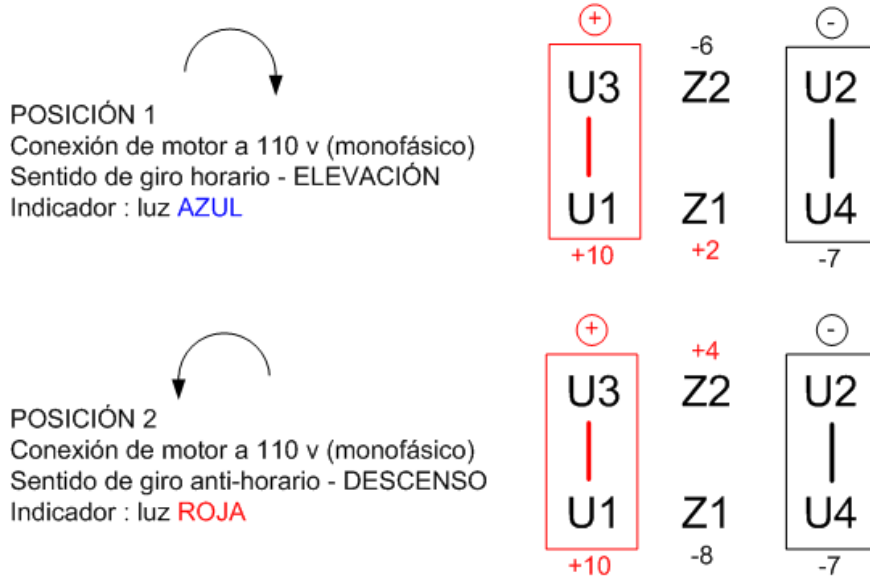
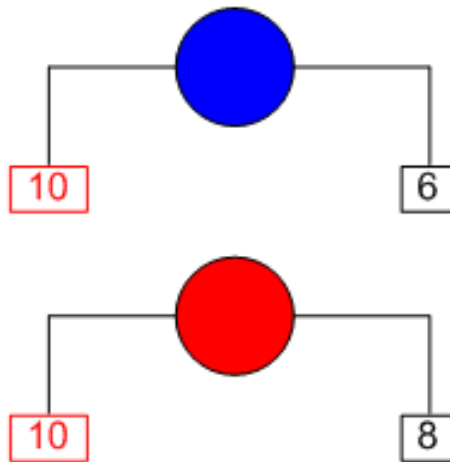


Figura 94. Diagrama de conexión eléctrica de los indicadores luminosos

Conexión de luces indicadoras

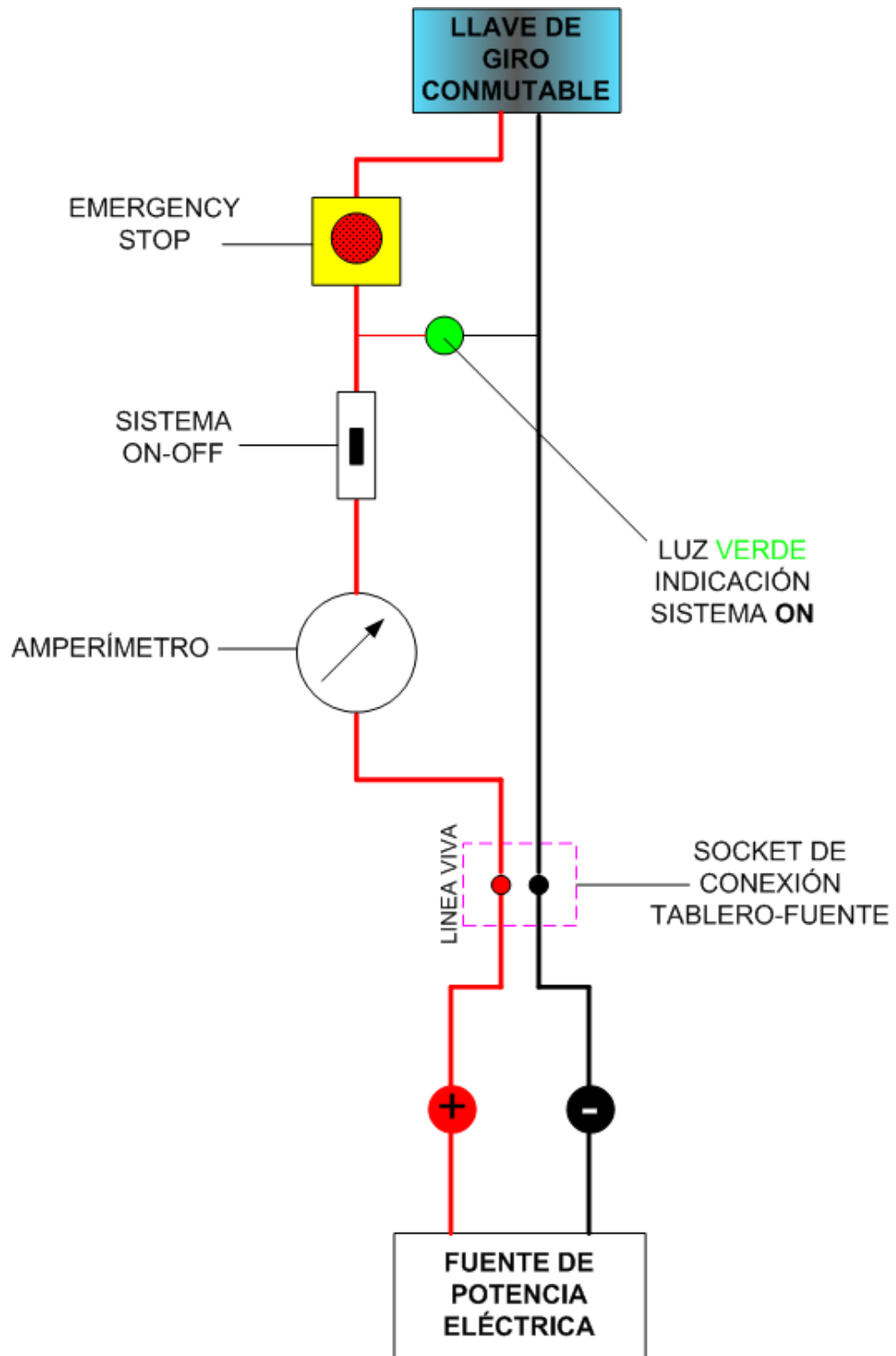


Modulo de potencia

- Interruptor ON-OFF del sistema: Permite el encendido y el apagado del equipo, mediante el desplazamiento de arriba-abajo por palanca.
- Indicador luminoso: permite visualizar el encendido del sistema (posición ON) mediante una luz verde.

El diagrama de conexión eléctrica general del sistema se muestra esquematizado en la figura 95.

Figura 95. Diagrama eléctrico de la conexión general del sistema



3.1.1.16 Manguera de conducción a tanque

Es una línea directa en material sintético (polímero transparente) de 2" de diámetro el cual es apropiado para una conducción rápida y sin inconvenientes del crudo extraído hacia el tanque de almacenamiento, promovida por una pequeña cota de elevación.

Figura 96. Manguera implementada de conducción a tanque del crudo recuperado



3.1.2 Selección de piezas preconstruidas.

A continuación se mostrarán algunos de los componentes implementados en el sistema, cuya escogencia corresponde al diseño o parámetros de funcionamiento pre-establecidos con anterioridad.

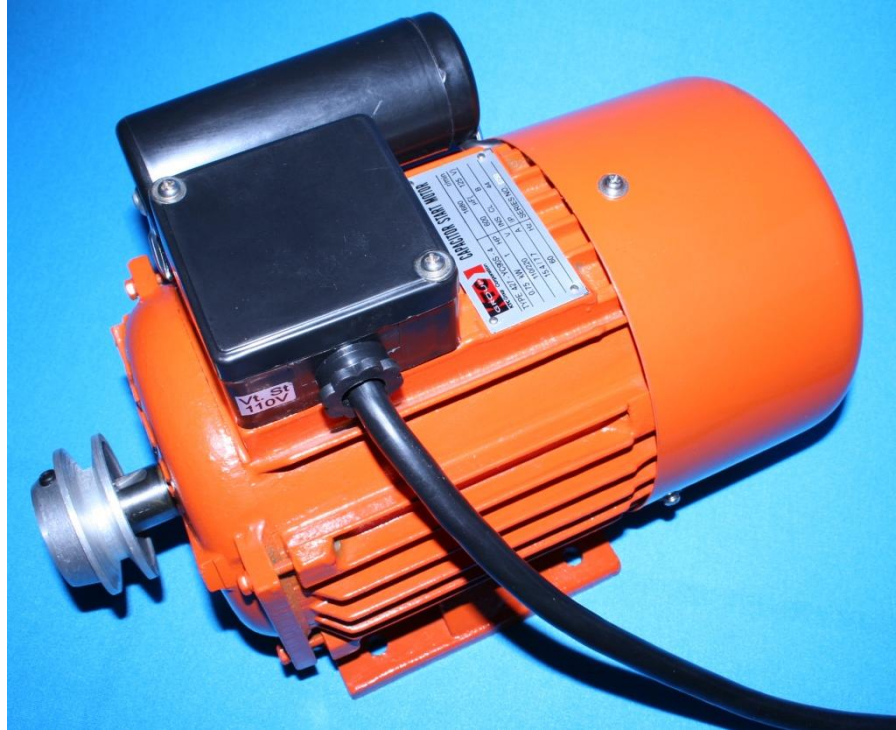
3.1.2.1 Motor eléctrico

Este componente provee la energía dinámica necesaria al sistema para operar de forma continua, efectiva y rentable; su selección es realizada en base a los valores de *potencia*, *torque* y *velocidad angular* necesarios para obtener un volumen de hidrocarburo recuperado preestablecido, a un mínimo de consumo eléctrico. De acuerdo a los cálculos realizados en el capítulo 3, se establecieron los siguientes parámetros técnicos del motor, para llevar a cabo una recuperación de **6.87** litros de crudo por ciclo.

- Consumo de potencia: 0.75 kw – 1 Hp monofásico
- Velocidad angular: 1680 RPM
- Voltaje: 110 – 220 voltios
- Consumo: 15.4 – 7.7 amperios
- Frecuencia: 60 Hz
- Capacitancia para el arranque: 60 μ F (125V)
- Número de polos: 4
- INS. clase B (cerrado)
- IP 44

De esta manera fue seleccionado por catalogo (fabricante KTC) el modelo **427-YC90S-4**; el cual responde a los requerimientos establecidos.

Figura 97. Motor eléctrico implementado

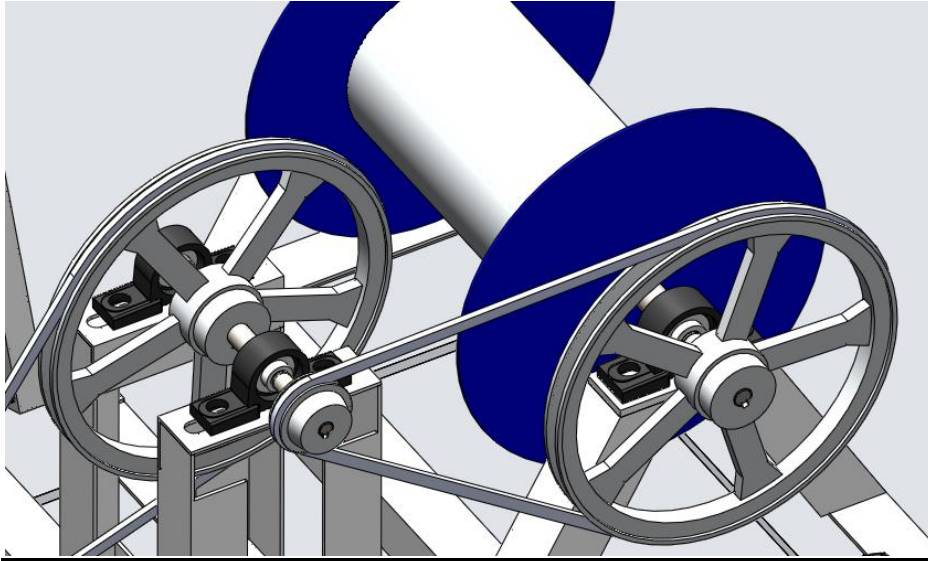


3.1.2.2 Cojinetes de elementos rodantes (chumaceras)

El proceso de selección de los rodamientos que fueron adicionados en el componente motriz, fue seguido del libro “Diseño de elementos de máquinas de ROBERT L. MOTT.

Las posiciones de los rodamientos implementados en el sistema pueden ser vistas en la siguiente figura.

Figura 98. Ubicaciones en el sistema de las chumaceras



Rodamientos del eje del tambor de arrollamiento

Carga radial máxima $\rightarrow R_{\max} = \sqrt{(38.51)^2 + (7.945)^2} \rightarrow R_{\max} = 39,321\text{Lbf}$

Esta se encuentra ubicada en la sección (B) del eje del tambor de arrollamiento, y los valores fueron tomados de las fuerzas cortantes que actúan en dicho punto en el caso 2 resuelto para el cálculo de dicho eje.

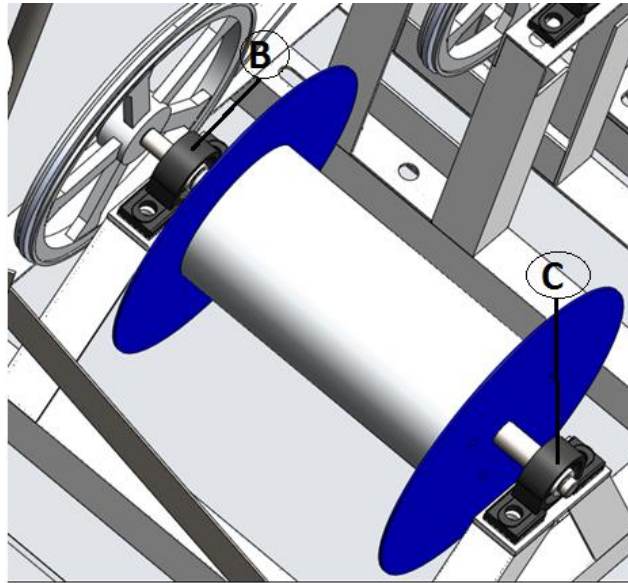
Carga de empuje:

Estas cargas son relativamente pequeñas por lo tanto no son tomados en cuenta la momento de selección de rodamiento.

Velocidad de eje:

$n_e = 78.125 \text{ rpm}$

figura 99. Posición de los rodamientos del tambor



Duración de diseño $L_{10} = 200000$ horas [tabla 14-4, pág.612 diseño de Mott]

Factor de corrección $k=3$ para rodamiento de bolas [Pág.606, diseño de Mott]

Capacidad de carga dinámica (C)

$$C = Pd \left(\frac{L_d}{10^6} \right)^{\frac{1}{k}} \rightarrow [\text{pág. 611}]$$

$$Pd = R_{\max} = 39.321 \text{ Lbf}$$

$$L_d = L_{10} * n_e * 60 \text{ min/h} \rightarrow [\text{pág. 611}]$$

$$L_d = 2 * 10^5 \text{ h} * 78.125 \text{ rev/min} * 60 \text{ min/h} \rightarrow L_d = 9,375 * 10^8 \text{ rev}$$

$$C = 39,321 \text{ Lbf} * \left[\frac{9,375 * 10^8}{10^6} \right]^{1/3} \rightarrow C = 384,81 \text{ Lbf}$$

Selección de rodamiento:

El rodamiento a seleccionar debe cumplir los siguientes requerimientos

d= diámetro interno → $d= \frac{3}{4}$

c= carga dinámica → $c= 384.81 \text{ Lbf}$

Se selecciona el rodamiento de bolas de una sola hilera de ranura profunda **6204**, que cumple con dichos requerimientos. [Pág.607,Tabla 14-3 diseño de Mott]

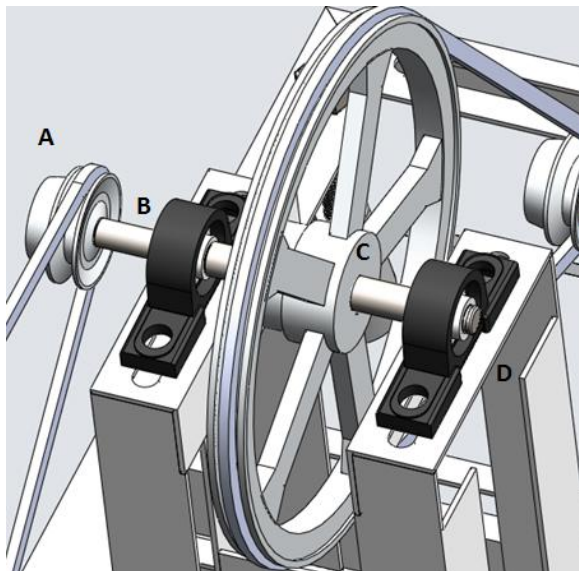
$d=3/4 \text{ C}_{\text{máx.}} =2210 \text{ Lbf}$

Rodamientos del eje de la polea intermedia

Carga radial máxima → $R_{\text{max}} = (16,7)^2 + (39,26)^2 \rightarrow R_{\text{max}} = 42,66 \text{ Lbf}$

Esta se encuentra ubicada en la sección (D) del eje de las poleas intermedias, los valores fueron tomados de las fuerzas cortantes que actúan en dicho punto.

Figura 100. Posición de los rodamientos del eje de la polea intermedia



Carga de empuje:

Estas cargas son relativamente pequeñas por lo tanto no son tomados en cuenta al momento de la selección del rodamiento.

Velocidad de eje:

$$n_e = 375 \text{ rpm}$$

Duración de diseño $L_{10} = 200000$ horas [Pág.612,Tabla 14-4 diseño de Mott]

Factor de corrección $k=3$ para rodamiento de bolas [Pág.606,diseño de Mott]

Capacidad de carga dinámica (C)

$$C = Pd (Ld/10^6)^{\frac{1}{k}} \rightarrow \text{[Pág.611,diseño de Mott]}$$

$$Pd = R_{\max} = 42,66 \text{ Lbf}$$

$$Ld = L_{10} * n_e * 60 \text{ min/h} \rightarrow \text{[Pág.611,diseño de Mott]}$$

$$Ld = 2 * 10^5 \text{ h} * 375 \text{ rev/min} * 60 \text{ min/h} \rightarrow Ld = 4,5 * 10^9 \text{ rev}$$

$$C = 42,66 \text{ Lbf} * \left[\frac{4,5 * 10^9 \text{ rev}}{10^6} \right]^{1/3} \rightarrow C = 704,3 \text{ Lbf}$$

El rodamiento a seleccionar debe cumplir los siguientes requerimientos

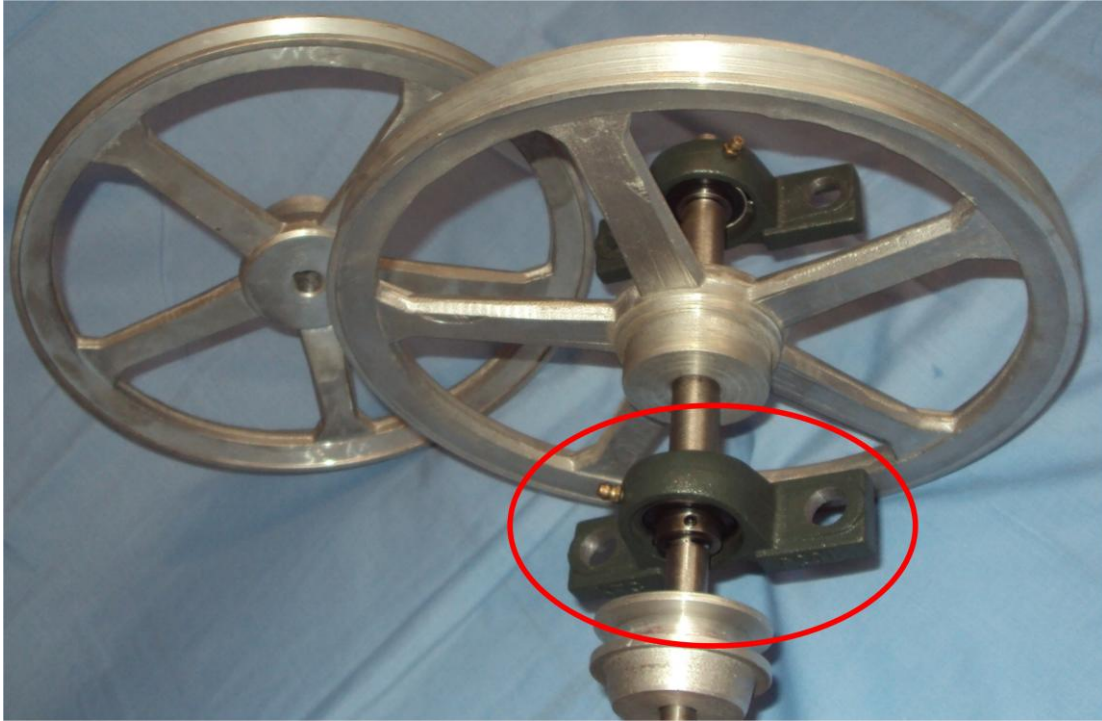
$$d = \text{diámetro interno} \rightarrow d = 5/8$$

$$c = \text{carga dinámica} \rightarrow c = 704,3 \text{ Lbf}$$

Se selecciona el rodamiento de bolas de una sola hilera de ranura profunda **6203** que cumple con dichos requerimientos. [Pág.607,Tabla 14-3 diseño de Mott]

$$d = 5/8 \quad c = 1660 \text{ Lbf}$$

Figura 101. Rodamientos de pedestal implementados



3.1.2.3 Válvula serie 150 para seguridad en la boca del pozo

Las estrictas condiciones de seguridad que se manejan en la industria petrolera, exigen la implementación de elementos y componentes adecuados para prevenir y manejar cualquier situación de emergencia o peligro; por ello ha sido incorporada en el sistema una válvula apropiada para esta aplicación.

La selección o escogencia de esta última se hizo conforme a los valores de presión media que pueden llegar a manejarse en un pozo abandonado

(del orden de 30 a 80 psi); por ello se adicionó una válvula tipo cortina serie 150 (**Pmax. 150psi**) comúnmente utilizada en líneas de oleoducto; para de esta manera conseguir aislar el equipo y cerrar la boca del pozo en una situación de alto riesgo.

Figura 102. Válvula serie 150 implementada en el sistema



4. MODELAMIENTO DEL SISTEMA

Si bien un exigente proceso de diseño pronostica unos resultados confiables y seguros en lo que a un óptimo funcionamiento se refiere, no se debe descartar la simulación de la aplicación en cuestión en un entorno virtual, en el cual se definan unos parámetros de entrada y se procesen mediante un modelo matemático que muestre un comportamiento de operación que valide y ratifique lo esperado en la fase de diseño.

Por ello el sistema en cuestión ha sido modelado y sometido al procesamiento analítico del programa *MATLAB*, el cual es desarrollado en las siguientes secciones.

4.1 DETERMINACIÓN DE VARIABLES

En esta sección se busca llevar a cabo la elaboración de una expresión matemática que refleje el comportamiento dinámico del sistema durante su operación; para ello son escogidos dos componentes claves; el tambor de arrollamiento y el cable de elevación. Entre estos dos últimos se busca encontrar una forma de relación que muestre los efectos rotacionales del primero sobre el estado del segundo, es decir sobre parámetros tales como la posición, la velocidad y la aceleración de dicho cable.

Para comenzar, retomamos algunas variables conocidas con anterioridad; estas son:

Velocidad de rotación del tambor $n \rightarrow 48.125$ rpm

Diámetro del cable $d \rightarrow 0.00158$ m

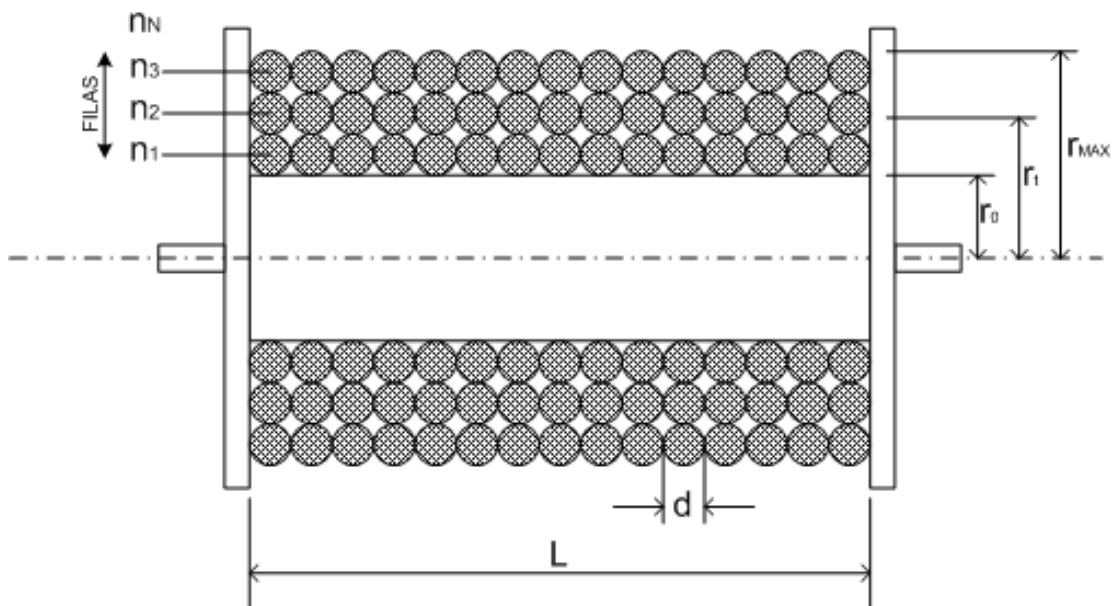
Longitud del tambor de arrollamiento $L \rightarrow 0.316$ m

Radio mínimo de arrollamiento $r_0 \rightarrow 0.076$ m

Radio máximo de arrollamiento $r_{\max} \rightarrow 0.0902$ m

A continuación identificamos las mismas en el esquema mostrado para el tambor de arrollamiento en la figura 103.

Figura 103. Variables esquematizadas en el tambor de arrollamiento



Tenemos entonces que:

$$n * d = L$$

$n = L/d \rightarrow 0.316/0.00158 = 200$ espiras. \rightarrow Números de espiras por longitud de tambor.

La variación de los radios será:

$$\begin{aligned}r_i &= r_0 + id & r_1 &= 0.0760 + 1 * 0.00158\text{m} = 0.0776\text{m} \\r_1 &= r_0 + d \\r_2 &= r_0 + 2d \\r_{i3} &= r_0 + 3d \dots\dots\dots\end{aligned}$$

La variación de los perímetros será:

$$\begin{aligned}P_i &= 2 * \pi * r_0 & P_1 &= 2 * \pi * 0.0760 = 0.4775 \text{ m} \\P_1 &= 2 * \pi * r_1 \\P_2 &= 2 * \pi * r_2 \\P_3 &= 2 * \pi * r_3 \dots\dots\dots\end{aligned}$$

La longitud recogida por fila en función del perímetro será:

$$\begin{aligned}P_{ni} &= n_i * P_i & P_{n1} &= 200 * 0.4775\text{m} = 95.5 \text{ m} \\P_{n1} &= n_1 * P_1 \\P_{n2} &= n_2 * P_2 \\P_{n3} &= n_3 * P_3 \dots\dots\dots\end{aligned}$$

Se procede entonces a organizar los valores obtenidos anteriormente para la longitud de cable recogida por fila, el radio correspondiente a dicha longitud y la longitud total en el instante determinado; es decir sus correspondientes desplazamientos y posiciones en un instante dado en el tambor. Las siguientes tablas organizan dichos valores.

Tabla 18. Comportamiento ascendente del sistema (elevación)

r_0	Radios de tambor (m)	P_0	Perímetro (m)	P_{n0}	Longitud recorrida por fila (m)	Longitud total recorrida (m)
0	0.0760	1	0.4775	1	95.5	95.5
1	0.0776	2	0.4876	2	97.515	193.015
2	0.0792	3	0.4976	3	99.525	292.54
3	0.0807	4	0.5070	4	101.411	393.950
4	0.0823	5	0.5171	5	103.421	497.371
5	0.0839	6	0.5272	6	105.432	602.803
6	0.0855	7	0.5372	7	107.442	710.245
7	0.0870	8	0.5466	8	109.327	819.572
8	0.0886	9	0.5567	9	111.338	930.91
9	0.0902	10	0.5667	10	113.349	1044.259

Tabla 19. Comportamiento descendente del sistema (bajada)

r_0	Radios de tambor (m)	P_0	Perímetro (m)	P_{n0}	Longitud recorrida por fila (m)	Longitud total recorrida (m)
0	0.0902	1	0.5667	1	113.349	113.349
1	0.0886	2	0.5567	2	111.338	224.687
2	0.0870	3	0.5466	3	109.327	334.014
3	0.0855	4	0.5372	4	107.442	441.456
4	0.0839	5	0.5272	5	105.432	546.888
5	0.0823	6	0.5171	6	103.421	650.309
6	0.0807	7	0.5070	7	101.411	751.72
7	0.0792	8	0.4976	8	99.525	851.245
8	0.0776	9	0.4876	9	97.515	948.76
9	0.0760	10	0.4775	10	95.5	1044.26

4.2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Variación del radio en el ascenso del elemento recolector:

$$r(t) = r_0 + \frac{Wdt}{200}$$

$$r(t) = 0.07442 + 1.0286 E^{-5} t$$

W(rev/seg)
d(metros)
t(seg)

Variación del radio en el descenso del elemento recolector:

$$r(t) = r_0 + \frac{Wdt}{200}$$

$$r(t) = 0.09178 - 1.0286 E^{-5} t$$

W(rev/seg)
d(metros)
t(seg)

4.3 ECUACIONES DE POSICIÓN Y VELOCIDAD EN EL RANGO DE TIEMPO APLICABLE

Una vez determinado el modelo matemático que predice el valor del radio en un instante de tiempo determinado para el tambor de arrollamiento, se procede a formular las respectivas ecuaciones de posición y velocidad del cable derivadas del análisis anterior

Ecuaciones de desplazamiento ascendente X(t) (subida)

$$\begin{aligned} X(t) = & 2\pi W[(t_a - t_o)[0,07442 + 1.028E^{-5}t_a]_{t_0=0}^{t_1=153.6} \\ & + (t_b - t_1)[0,07442 + 1.028E^{-5}t_b]_{t_1=153.6}^{t_2=307.2} \\ & + (t_c - t_2)[0,07442 + 1.028E^{-5}t_c]_{t_2=307.2}^{t_3=460.8} \\ & + (t_d - t_3)[0,07442 + 1.028E^{-5}t_d]_{t_3=460.8}^{t_4=614.8} \\ & + (t_e - t_4)[0,07442 + 1.028E^{-5}t_e]_{t_4=614.8}^{t_5=768} \\ & + (t_f - t_5)[0,07442 + 1.028E^{-5}t_f]_{t_5=768}^{t_6=921.6} \\ & + (t_g - t_6)[0,07442 + 1.028E^{-5}t_g]_{t_6=921.6}^{t_7=1075,2} \\ & + (t_h - t_7)[0,07442 + 1.028E^{-5}t_h]_{t_7=1075.2}^{t_8=1228.8} \\ & + (t_i - t_8)[0,07442 + 1.028E^{-5}t_i]_{t_8=1228.8}^{t_9=1382.4} \\ & + (t_j - t_9)[0,07442 + 1.028E^{-5}t_j]_{t_9=1382.4}^{t_{10}=1536} \end{aligned}$$

Ecuaciones de desplazamiento descendente X(t) (bajada)

$$\begin{aligned} X(t) = & 2\pi W[(t_a - t_o)[0,09178 - 1.0286E^{-5}t_a]_{t_0=0}^{t_1=153.6} \\ & + (t_b \\ & - t_1)[0,09178 - 1.0286E^{-5}t_b]_{t_1=153.6}^{t_2=307.2} \\ & + (t_c - t_2)[0,09178 - 1.0286E^{-5}t_c]_{t_2=307.2}^{t_3=460.8} \\ & + (t_d - t_3)[0,09178 - 1.0286E^{-5}t_d]_{t_3=460.8}^{t_4=614.8} \\ & + (t_e - t_4)[0,09178 - 1.0286E^{-5}t_e]_{t_4=614.8}^{t_5=768} \\ & + (t_f - t_5)[0,09178 - 1.0286E^{-5}t_f]_{t_5=768}^{t_6=921.6} \\ & + (t_g - t_6)[0,09178 - 1.0286E^{-5}t_g]_{t_6=921.6}^{t_7=1075,2} \\ & + (t_h - t_7)[0,09178 - 1.0286E^{-5}t_h]_{t_7=1075.2}^{t_8=1228.8} \\ & + (t_i - t_8)[0,09178 - 1.0286E^{-5}t_i]_{t_8=1228.8}^{t_9=1382.4} \\ & + (t_j - t_9)[0,09178 - 1.0286E^{-5}t_j]_{t_9=1382.4}^{t_{10}=1536} \end{aligned}$$

Ecuaciones de velocidad ascendente V (t) (subida)

$$V(t_a) = 2\pi W[0,07442 + 1.028E^{-5}t_a]_{t_0=0}^{t_1=153.6}$$

$$V(t_b) = 2\pi W[0,07442 + 1.028E^{-5}t_b]_{t_1=153.6}^{t_2=307.2}$$

$$V(t_c) = 2\pi W[0,07442 + 1.028E^{-5}t_c]_{t_2=307.2}^{t_3=460.8}$$

$$V(t_d) = 2\pi W[0,07442 + 1.028E^{-5}t_d]_{t_3=460.8}^{t_4=614.8}$$

$$V(t_e) = 2\pi W[0,07442 + 1.028E^{-5}t_e]_{t_4=614.8}^{t_5=768}$$

$$V(t_f) = 2\pi W[0,07442 + 1.028E^{-5}t_f]_{t_5=768}^{t_6=921.6}$$

$$V(t_g) = 2\pi W[0,07442 + 1.028E^{-5}t_g]_{t_6=921.6}^{t_7=1075.2}$$

$$V(t_h) = 2\pi W[0,07442 + 1.028E^{-5}t_h]_{t_7=1075.2}^{t_8=1228.8}$$

$$V(t_i) = 2\pi W[0,07442 + 1.0286E^{-5}t_i]_{t_8=1228.8}^{t_9=1382.4}$$

$$V(t_j) = 2\pi W[0,07442 + 1.0286E^{-5}t_j]_{t_9=1382.4}^{t_{10}=1536}$$

Ecuaciones de velocidad descendente V (t) (bajada)

$$V(t_a) = 2\pi W[0,09178 - 1.028E^{-5}t_a]_{t_0=0}^{t_1=153.6}$$

$$V(t_b) = 2\pi W[0,09178 - 1.028E^{-5}t_b]_{t_1=153.6}^{t_2=307.2}$$

$$V(t_c) = 2\pi W[0,09178 - 1.028E^{-5}t_c]_{t_2=307.2}^{t_3=460.8}$$

$$V(t_d) = 2\pi W[0,09178 - 1.028E^{-5}t_d]_{t_3=460.8}^{t_4=614.8}$$

$$V(t_e) = 2\pi W[0,09178 - 1.028E^{-5}t_e]_{t_4=614.8}^{t_5=768}$$

$$V(t_f) = 2\pi W[0,09178 - 1.028E^{-5}t_f]_{t_5=768}^{t_6=921.6}$$

$$V(t_g) = 2\pi W[0,09178 - 1.028E^{-5}t_g]_{t_6=921.6}^{t_7=1075.2}$$

$$V(t_h) = 2\pi W[0,09178 - 1.028E^{-5}t_h]_{t_7=1075.2}^{t_8=1228.8}$$

$$V(t_i) = 2\pi W[0,09178 - 1.0286E^{-5}t_i]_{t_8=1228.8}^{t_9=1382.4}$$

$$V(t_j) = 2\pi W[0,09178 - 1.0286E^{-5}t_j]_{t_9=1382.4}^{t_{10}=1536}$$

4.4 ANÁLISIS DINÁMICO DEL SISTEMA EN MATLAB

Una vez han sido determinadas las ecuaciones que modelan el comportamiento dinámico del sistema, se procede a implementar las mismas en el software que ha sido escogido para este propósito (MATLAB).

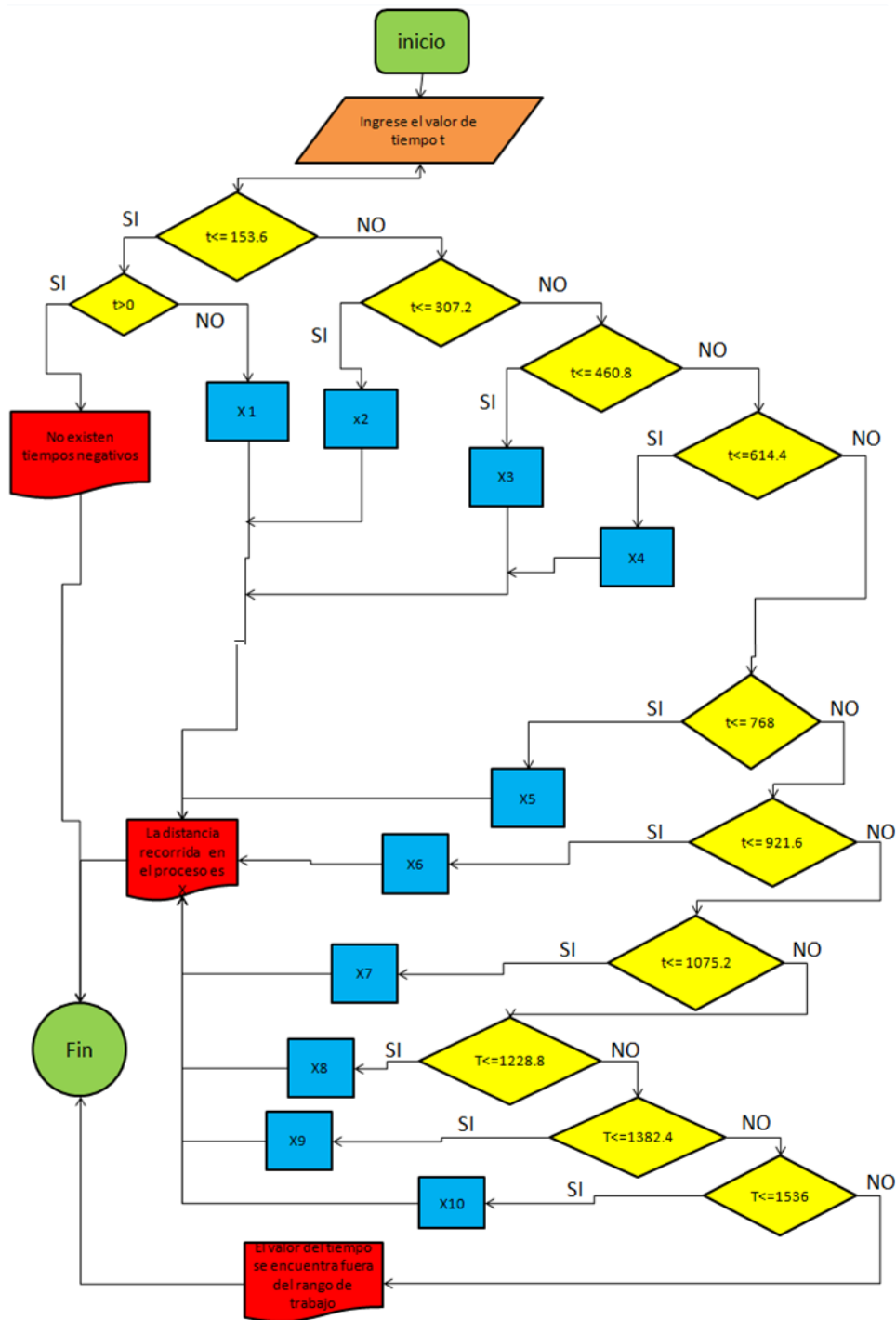
Para comenzar dicho estudio es necesario establecer el orden lógico en el desarrollo del proceso analítico del código fuente sugerido para la operación; de esta manera se elabora el diagrama de flujo correspondiente. En la realización de dicho diagrama se optó por utilizar un sistema estructurado anidado en cascada o proceso estructurado selectivo, este tipo de programación selectivo se caracteriza por cumplir con un orden jerárquico al momento de ejecutar sus ordenes y comandos. De modo seguido fueron establecidos los procesos (X_i) implementados en el código fuente (ver anexos) en base al cual se desarrollo el entorno gráfico (empleando la herramienta GUIDE del software) para cada uno de los casos analizados.

- Modelamiento del desplazamiento ascendente
- Modelamiento de la velocidad ascendente
- Modelamiento del desplazamiento descendente
- Modelamiento de la velocidad descendente

Por medio de este entorno gráfico es posible establecer las gráficas de comportamiento del sistema para un tiempo suministrado por el usuario.

Para finalizar se determinan los valores de aceleración instantánea correspondientes al modelo.

Figura 104. Diagrama de flujo diseñado para el proceso



Modelamiento del desplazamiento ascendente

Los valores de las variables (X_i) establecidos en el código fuente para el ascenso son los siguientes:

$$x1 = (2 * pi * (78.125./60)) * t * ((0.07442 + 1.0286 * 10^{(-5)} * t));$$

$$x2 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 153.6) * (0.07442 + 1.0286 * 10^{(-5)} * (t)))) + 95.5032);$$

$$x3 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 307.2) * (0.07442 + 1.0286 * 10^{(-5)} * (t)))) + 192.99);$$

$$x4 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 460.8) * (0.07442 + 1.0286 * 10^{-5} * (t)))) + 292.4617);$$

$$x5 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 614.4) * (0.07442 + 1.0286 * 10^{-5} * (t)))) + 393.9176);$$

$$x6 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 768) * (0.07442 + 1.0286 * 10^{(-5)} * (t)))) + 497.3577);$$

$$x7 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 921.6) * (0.07442 + 1.0286 * 10^{-5} * (t)))) + 602.7821);$$

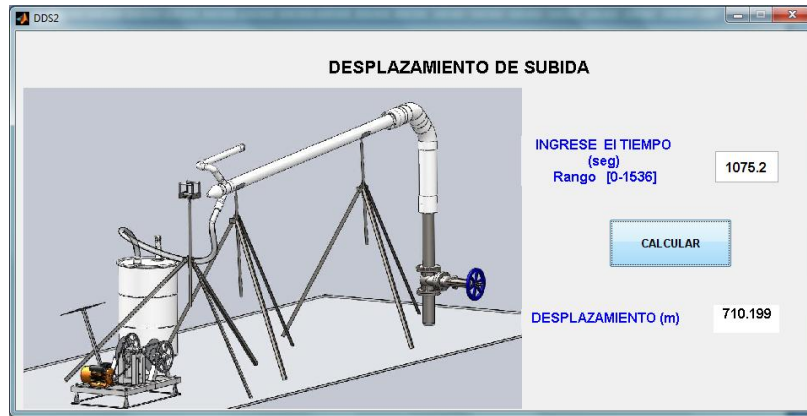
$$x8 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 1075.2) * (0.07442 + 1.0286 * 10^{-5} * (t)))) + 710.1907);$$

$$x9 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 1228.8) * (0.07442 + 1.0286 * 10^{-5} * (t)))) + 819.5835);$$

$$x10 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 1382.4) * (0.07442 + 1.0286 * 10^{-5} * (t)))) + 930.9606);$$

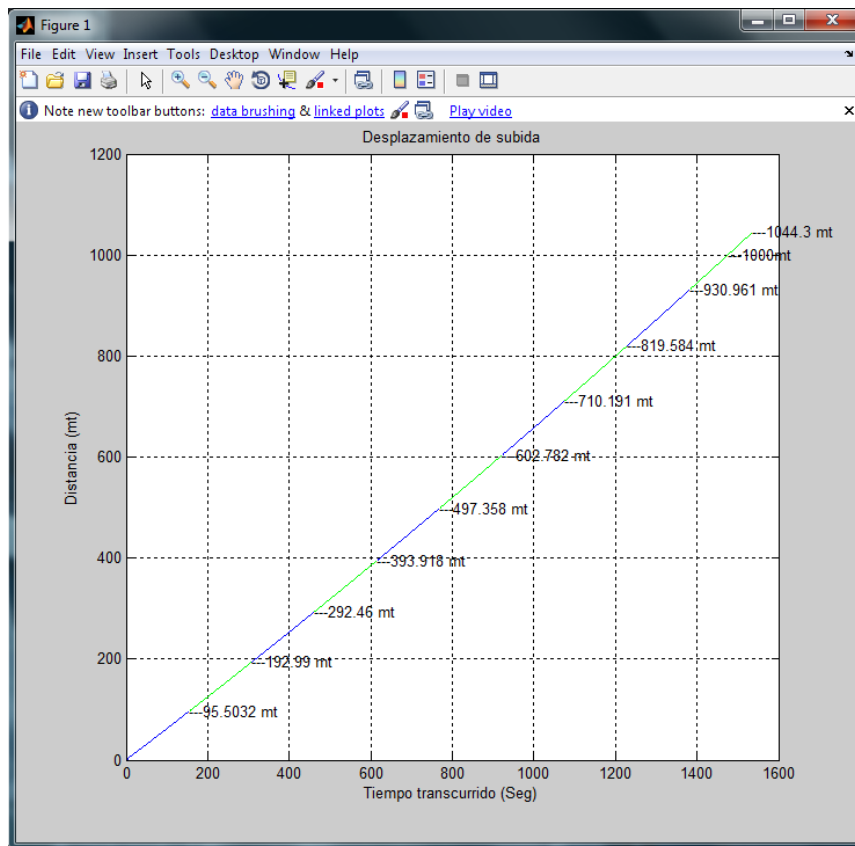
El entorno gráfico correspondiente al desarrollo del código fuente respectivo para este caso se muestra a continuación.

Figura 105. Entorno gráfico para la elevación



El comportamiento registrado por el sistema durante esta etapa es presentado en la figura 106.

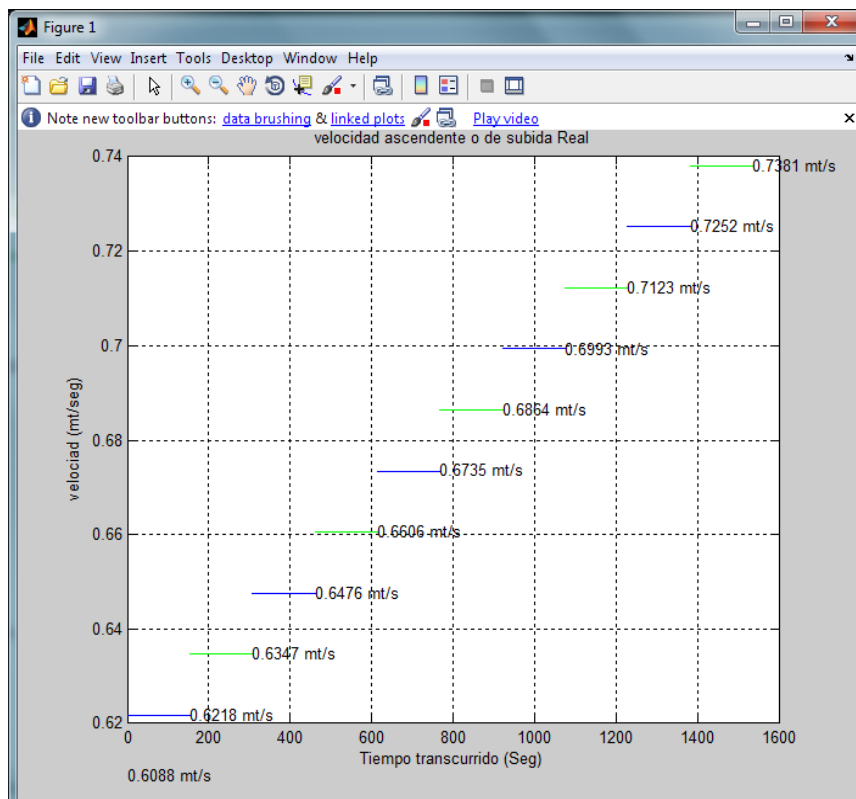
Figura 106. Desplazamiento del sistema durante la elevación



Modelamiento de la velocidad ascendente

Con la determinación del comportamiento de desplazamiento se procede a establecer las velocidades correspondientes. Estas se muestran en la figura 107., y validan su valor constante durante tramos o hileras del mismo radio en el tambor de arrollamiento.

Figura 107. Velocidad del sistema durante el ascenso



Modelamiento para del desplazamiento descendente

Los valores de las variables (X_i) establecidos en el código fuente para el descenso son los siguientes:

$$x1 = (2 * pi * (78.125./60)) * t * ((0.09178 - 1.0286 * 10^{(-5)} * t));$$

$$x2 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 153.6) * (0.09178 - 1.0286 * 10^{-5} * (t)))) + 113.3488);$$

$$x3 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 307.2) * (0.09178 - 1.0286 * 10^{-5} * (t)))) + 224.7122);$$

$$x4 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 460.8) * (0.09178 - 1.0286 * 10^{-5} * (t)))) + 334.0902);$$

$$x5 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 614.4) * (0.09178 - 1.0286 * 10^{-5} * (t)))) + 441.4828);$$

$$x6 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 768) * (0.09178 - 1.0286 * 10^{(-5)} * (t)))) + 546.89);$$

$$x7 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 921.6) * (0.09178 - 1.0286 * 10^{-5} * (t)))) + 650.3118);$$

$$x8 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 1075.2) * (0.09178 - 1.0286 * 10^{-5} * (t)))) + 751.7482);$$

$$x9 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 1228.8) * (0.09178 - 1.0286 * 10^{-5} * (t)))) + 851.1992);$$

$$x10 = ((2 * pi * (78.125./60)) * ((t - 1382.4) * (0.09178 - 1.0286 * 10^{-5} * (t)))) + 948.6648);$$

El entorno gráfico correspondiente al desarrollo del código fuente respectivo para este caso se muestra a continuación.

Figura 108. Entorno gráfico para el descenso

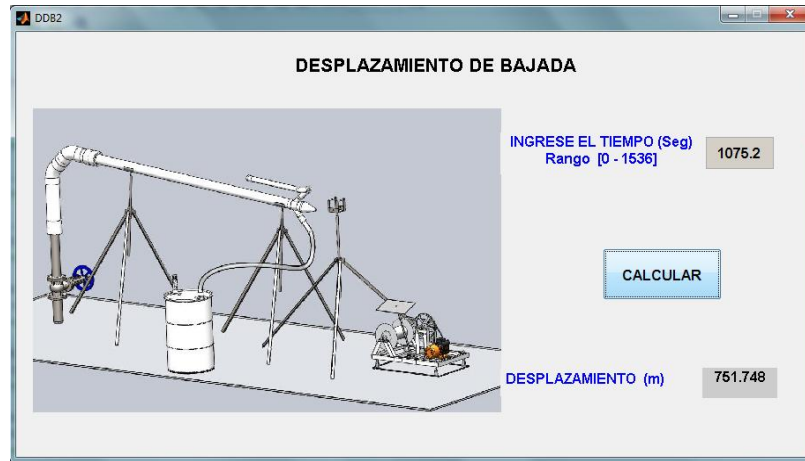
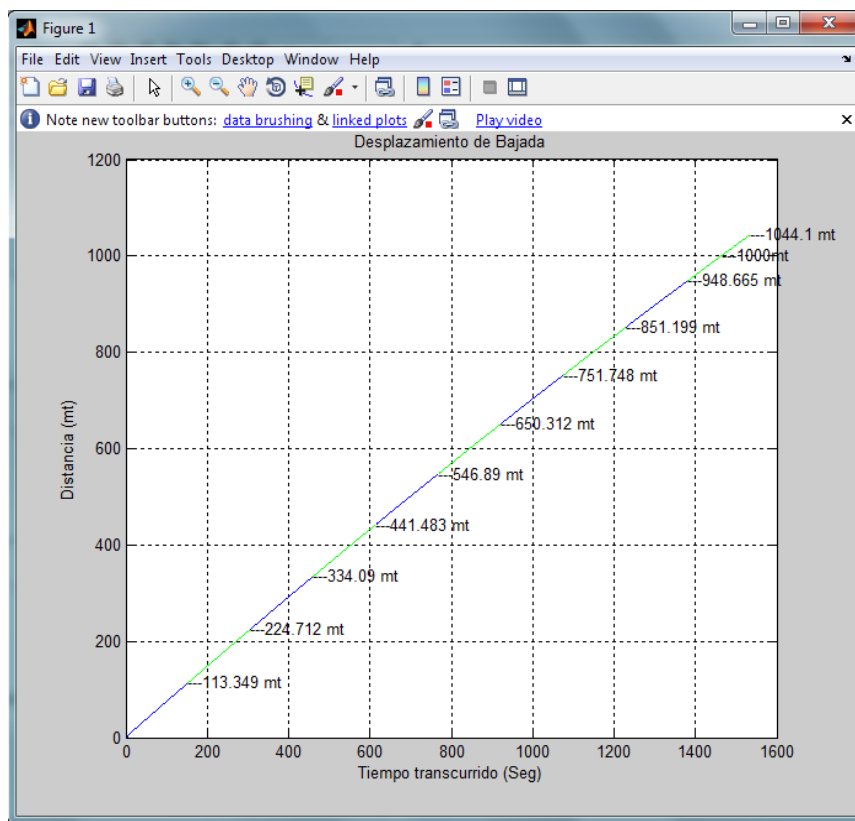


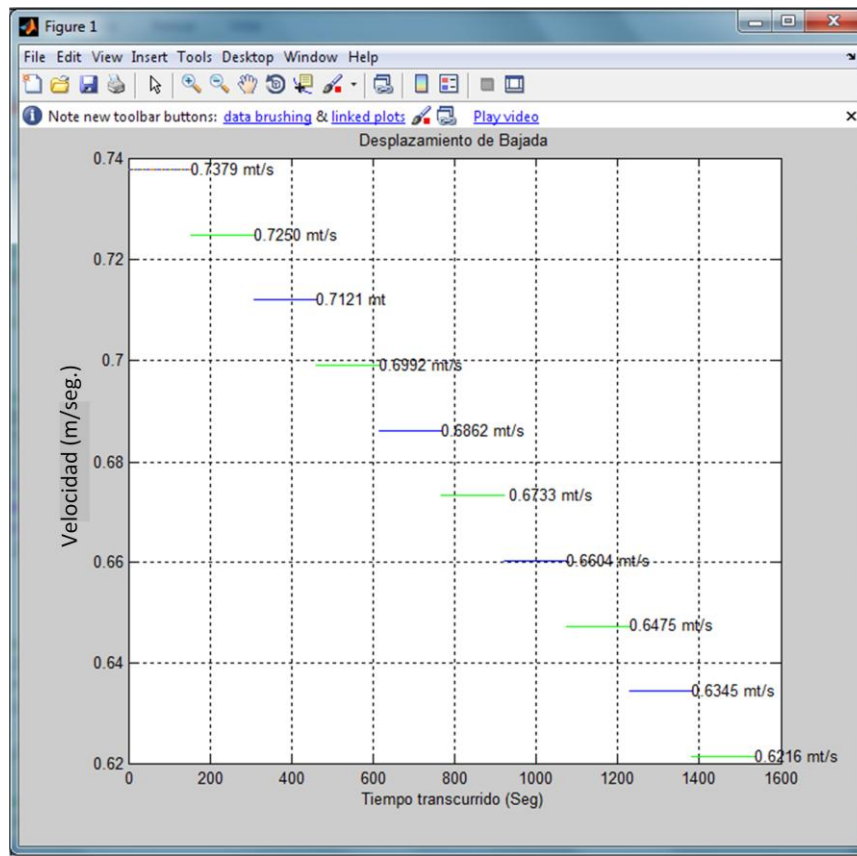
Figura 109. Desplazamiento del sistema durante el descenso



Modelamiento de la velocidad descendente

Con la determinación del comportamiento de desplazamiento se procede a establecer las velocidades correspondientes. Estas se muestran en la figura 110., y validan su valor constante durante tramos o hileras del mismo radio en el tambor de arrollamiento.

Figura 110. Velocidad del sistema durante el descenso



Aceleraciones instantáneas presentes en el sistema

Para consolidar el análisis del modelamiento dinámico se determinan los valores de aceleración que registra el sistema en funcionamiento; estos datos serán empleados en la fase de diseño anteriormente elaborada. Aplicando la formula cinemática para la velocidad lineal de un cuerpo, expresada como:

$$v = v_0 + at$$

Se realiza un estimado donde se formula que el cambio de radio en el tambor de arrollamiento es realizado en un ángulo de giro de 30 grados o en 1/12 de revolución.

1 revolución se realiza en $\rightarrow 0,768$ segundo

30 grados $\rightarrow 0,5236$ rad $\rightarrow 1/12$ rev

Por lo tanto el tiempo para 30 grados de rotación es de:

$$t_{30} = 0.064 \text{ seg}$$

La ecuación de la aceleración será:

$$a = \frac{v_i - v_0}{t_{30}}$$

$$a = \frac{0.6347 - 0.6218}{0.064} = \mathbf{0,20156} \frac{m}{s^2} \rightarrow \text{Aceleración ascendente}$$

La fuerza que se presenta por el cambio de aceleración es considerada como una fuerza inercial propia del sistema, esta es expuesta de la siguiente forma:

$$f = (m_{recolector} + m_{cable} + m_{hidrocarburo} + m_{contrapeso}) * a_i$$

$$f = 30kgm * 0.2156 \frac{m}{s^2} = 6.0468N$$

$$f = 0.60468 kgf$$

Los valores de aceleración registrados para cada caso, y sus respectivas fuerzas instantáneas se listan en la siguiente tabla.

Tabla 20. Aceleraciones y fuerzas instantáneas en el sistema

Tipo de movimiento	Aceleración promedio (m/s ²)	Fuerza promedio (kgf)
Ascendente	0.20156	0.6166
Descendente	0.20312	0.6214

Considerando los valores de fuerza tan baja que se imprime sobre el sistema como consecuencia de la poca aceleración, y teniendo en cuenta que ésta carga repercute sobre el diseño del componente correspondiente al cable de elevación, se decide amplificar su valor por un factor de 5 (quedando la fuerza por aceleración en 3.5 Kg-f), contemplando cualquier eventualidad que se presente durante los viajes de recuperación, de modo que el diseño presente un carácter conservativo.

5. OPERACIÓN DEL SISTEMA

Para complementar el desarrollo que se ha venido realizando desde los primeros capítulos de este libro es necesario dar a conocer la dinámica o el funcionamiento general que presenta el sistema y es esperado del mismo; de igual forma se establecerán las labores y los procedimientos de mantenimiento requeridos para preservar en excelentes condiciones de disponibilidad y confiabilidad el estado del equipo y por último se llevará a cabo un estudio del consumo energético llevado a cabo por el sistema, frente a los valores de hidrocarburo recuperado para determinar la rentabilidad que éste ofrece al momento de encontrarse operando.

5.1 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

Conocida la base operacional del diseño, se explicará el proceso para llevar a cabo la tarea de extracción y completar de esta manera un ciclo de producción.

El inicio de las actividades de recuperación comienza con un suministro de carga eléctrica que se le da al motor en un instante determinado por un elemento de control (llave de giro conmutable); inmediatamente este es puesto en marcha transmite mediante un conjunto de bandas y poleas, el torque necesario y la velocidad angular requerida en el tambor de arrollamiento para liberar el cable que circula fácilmente por la guía de apoyo del trípode inicial, y continua a lo largo de los cilindros guías,

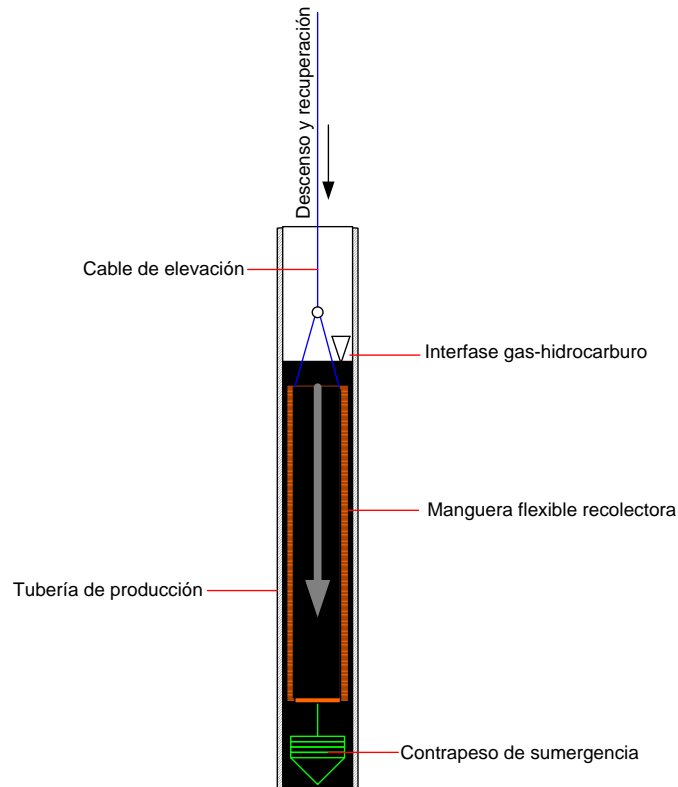
permitiendo el desplazamiento descendente de la manguera colectora a lo largo de la tubería de producción que guarda a un determinado nivel de profundidad reservas de hidrocarburo.

Una vez es determinado un valor inicial para comenzar la extracción (mediante viajes de prueba), se establecen los siguientes ciclos de recogida para distancias iguales al primer valor de profundidad más un diferencial un poco mayor a la longitud del elemento recolector en el segundo, dos diferenciales para el tercer ciclo y así sucesivamente.

Aproximándose al nivel de recuperación, el elemento colector comienza ingresando el contrapeso de sumergencia al interior de la fase líquida, inmediatamente continua descendiendo hasta estar unos pocos centímetros por debajo de la interfase gas-hidrocarburo permaneciendo un tiempo calculado para completar su llenado y garantizar la eficiencia del viaje.

Completada esta actividad, el control en superficie da la orden de cambio de giro en el motor eléctrico y se da la consecuente recogida del cable por parte del carretel que eleva la carga productiva hacia el nivel cero asignado a la boca del pozo.

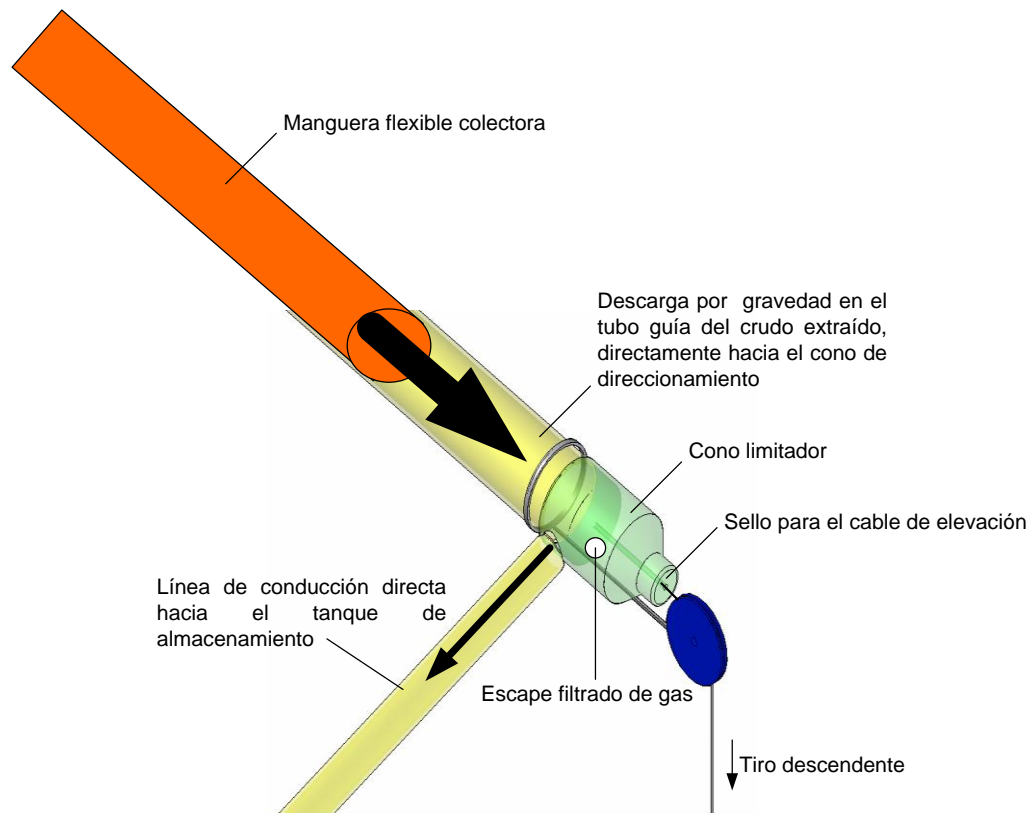
Figura 111. Descenso y recuperación de crudo en la profundidad de la tubería de producción



Llegado el contenido rescatado a la parte superior del tramo vertical del tubo guía, procede a ser reorientado por medio de unos rodillos ubicados en el cabezal de direccionamiento, sobre el cual se curva el colector hacia la parte semi-horizontal de mayor extensión del sistema, en la cual descansa completa y temporalmente la manguera recolectora, mientras desaloja por gravedad el crudo que trae en su interior y que se desplaza hacia el final del ducto inclinado, en donde es recibido por un cono de retención que permite el paso hermético del cable de elevación, el escape del gas que acompaña al

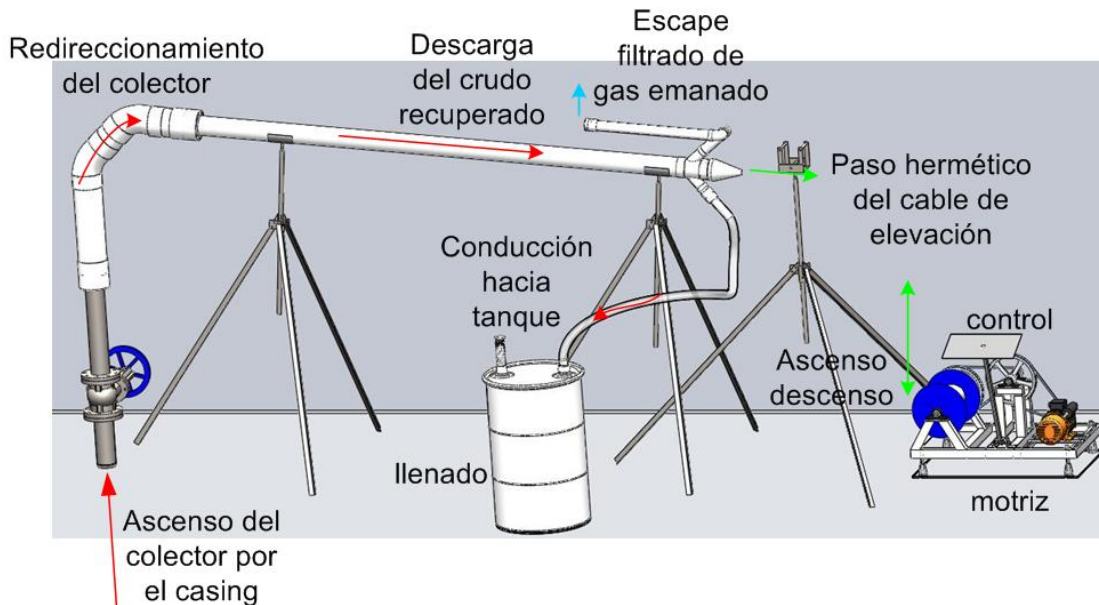
hidrocarburo y la disposición seguida de este último a una línea por la cual es conducido finalmente al tanque de almacenamiento.

Figura 112. Vista detallada del cono limitador



De esta manera se consigue completar un ciclo de producción, y dar inicio al siguiente, el cual es comenzado enviando nuevamente la orden de carga al motor eléctrico que reiniciara las actividades previamente descritas de forma inmediata.

Figura 113. Ascenso y descarga del crudo extraído por el sistema



5.1.1 Labores de inspección y mantenimiento.

Una operación eficiente, sin inconvenientes o paradas no programadas son el resultado de un diseño apropiado y de un estricto programa de inspección y mantenimiento que de manera periódica haga revisión de los estados de funcionamiento de los diversos componentes y parámetros específicos de los mismos.

De esta manera han sido identificados algunos elementos críticos, sobre los cuales se debe ejercer un control periódico preventivo que contempla determinadas actividades, listadas en la tabla 21.

Tabla 21. Actividades de inspección y mantenimiento del sistema

ELEMENTO	INSPECCIÓN	ACTIVIDAD	FRECUENCIA
Cable de elevación	Revisar la presencia de dobleces, torceduras, deformaciones permanentes, enganches, rotura de hilos, reacciones químicas por corrosión	Llevar registro del número de hilos rotos por torón y reemplazar completamente según lo establezca la norma	1 vez por mes
Correas	Verificar tensionamiento y configuración	Volver a tensionar	1 vez por mes
Rodamientos	Verificar estado de rodadura y sonidos anormales	Lubricar	1 vez por mes
Marco principal del componente motriz	Revisar presencia de grietas o señales de corrosión. Deformaciones permanentes y niveles de vibración	Limpieza de las superficies expuestas al medio y protección con laca. Medición de niveles de vibración	1 vez cada 3 meses
Ducto de descarga	Revisar presencia de lodos o parafinas que obstruyan el libre paso del crudo hacia el cono limitador	Limpiar el interior	1 vez cada 3 meses
Colector de recuperación	Revisar la presencia de agujeros o fugas en el contorno, así como el estado de su configuración	Remoción de incrustaciones o materiales depositados permanentemente en su interior	1 vez cada 3 meses
Filtros	Revisar niveles de filtrado y cantidad de depósitos de obstrucción	Inspección visual	1 vez por mes
Manguera de Conducción a tanque	Revisar presencia de lodos o parafinas que obstruyan el libre paso del crudo hacia el tanque	Remoción de incrustaciones o materiales depositados permanentemente en su interior	1 vez por mes

6. PRUEBA EN CAMPO

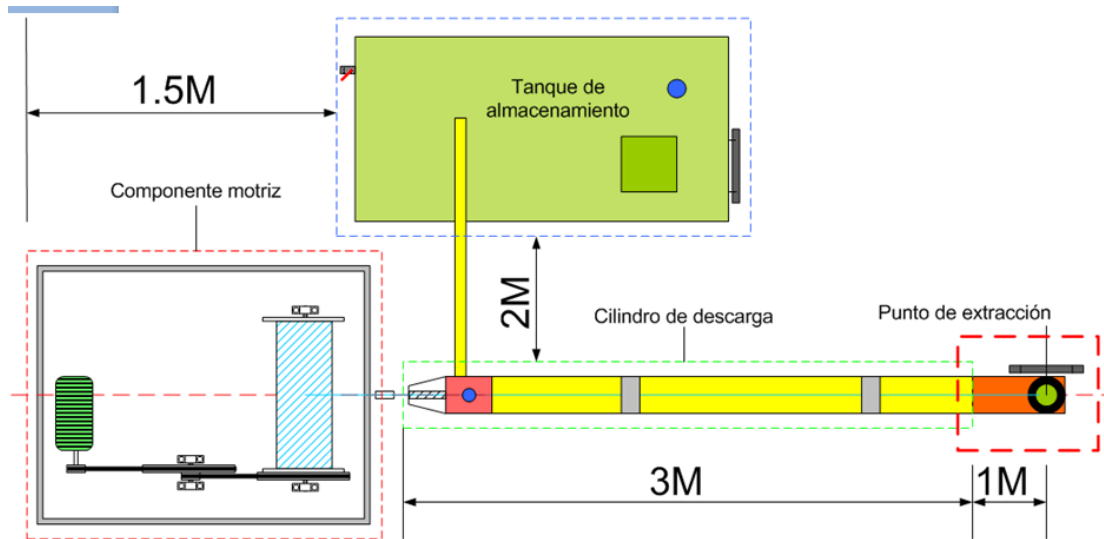
Consolidando el desarrollo global del sistema se procede a realizar la fase práctica, en la cual el equipo previamente diseñado y construido es montado y puesto a prueba en una locación con las condiciones de entorno apropiadas así como profundidad y orificio convenientes. De esta manera se consigue observar el comportamiento real que presentan los componentes implementados en la operación, las relaciones entre los mismos y su desempeño efectivo en la ejecución del proceso propuesto.

6.1 MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA

Antes de comenzar o poner en marcha el equipo, es necesario llevar a cabo una serie de procedimientos ordenados y preestablecidos, en la forma de ensamblar o montar el sistema; esto en razón a que se parte de un punto fijo determinado por el orificio en el cual se va hacer la extracción y de este último se comienzan a ubicar los diferentes componentes a las distancias definidas por la distribución en planta de la zona de trabajo.

El posicionamiento de cada parte instalada en el área de operación tiene como criterio el ubicar los elementos que manejan cargas eléctricas, a las distancias más alejadas del punto de ingreso de la línea en tierra, esto procurando prevenir cargas electroestáticas que puedan generar riesgos o situaciones peligrosas en dicho medio.

Figura 114. Distribución en planta del montaje del sistema



Posteriormente a la etapa de montaje es puesto en marcha el equipo, dando inicio en el tablero de mando y enviando el elemento colector en descenso para su llenado, recuperación y elevación del fluido rescatado.

Figura 115. Conexión del sistema en zona de pruebas



Figura 116. Sistema ensamblado en la zona de pruebas



Figura 117. Vista lateral del sistema en la zona de pruebas



6.1.1 Desempeño mostrado

La puesta en marcha del equipo permitió visualizar el comportamiento real del sistema así como la tasa de recuperación en condiciones aplicadas (capacidad de levantamiento) cuyos valores son analizados en el capítulo 7. El prototipo diseñado ejecutó de forma efectiva el descenso, la recuperación, la elevación y posterior descarga del fluido contenido al interior del colector.

El proceso mostró un arranque coordinado y esperado en relación a la disposición de los dispositivos montados en el tablero de control; el giro seguido de la llave conmutable dejó ver la correcta conexión de esta última con el motor eléctrico y la correspondiente liberación de cable en el tambor de arrollamiento. El desplazamiento del cable a través del cono limitador, el cilindro de descarga y el cabezal de direccionamiento se llevó a cabo sin ninguna complicación y de modo suave y controlado. Conforme se desenrollaba más cable, el display montado en el tablero de control iba mostrando los parámetros de operación tales como la profundidad y la velocidad de la línea.

Posteriormente a la determinación mediante varios descensos, se estableció un nivel inicial de recuperación, a partir del cual se programaron las siguientes recogidas. La elevación de la carga se realizó sin ninguna complicación, y el direccionamiento del fluido descartado se hizo correctamente según lo esperado. Algunas vibraciones del marco del componente motriz presentadas durante la puesta en marcha fueron solucionadas mediante un mayor ajuste de los elementos de unión (pernos), que sujetaban al carro de desplazamiento intermedio.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La interpretación y el estudio detallado de los valores de recuperación alcanzados son claves para determinar la viabilidad de implementar en masa un sistema como el que ha sido diseñado y construido; en tanto que permite establecer la relación que existe entre la utilidad y la inversión necesaria para lograrla.

La inversión económica hecha en el equipo debe ser suficiente para alcanzar valores rentables de producción al mostrar resultados positivos en la operación. Para determinar la rentabilidad es necesario conocer el valor invertido; en este caso energía eléctrica y la ganancia o producto de dicha inversión que en este caso la constituyen los barriles de crudo recuperado.

7.1 CONSUMO ENERGÉTICO VS. PRODUCCIÓN

Las variables utilizadas para realizar el análisis comparativo de consumo contra producción, que válida la implementación del sistema prototipo para la extracción de hidrocarburo remanente fueron los siguientes:

- Precios del barril de petróleo WTI actuales (promedios generales)
- Costo del KW/h en zonas rurales

Antes de entrar en materia de cálculos matemáticos relacionados a la rentabilidad generada por el equipo, es conveniente presentar un panorama de lo que ha sido la evolución del precio del barril de petróleo en los últimos años para tener mayores argumentos de justificación, del prototipo diseñado.

El precio del petróleo es quizás el factor más importante en la evaluación de este proyecto, ya que de él depende, en gran medida, la rentabilidad y aplicabilidad del equipo, más cuando se trata del levantamiento de un crudo que se encuentra abandonado y que puede llegar a ser vendido en el precio actual al que haya referencia.

El petróleo es uno de los productos más negociados en el mercado de futuros, debido a que su rentabilidad está ligada a las grandes variaciones en los precios, y ya no tanto, por el rendimiento generado en su producción como lo era anteriormente.

Figura 118. Evolución del precio del barril de petróleo WTI durante los dos últimos años



Los compradores adquieren petróleo a precios propuestos a futuro en los contratos de compra y venta, lo que en masa va generando una tendencia impulsada además, por un juego de especulaciones basadas en la declinación de la producción mundial de crudo. Es decir, aquellos que negocian petróleo en bolsa, no buscan (exceptuando en algunas ocasiones) suministrar u obtener cantidades de este producto, sino buscan realizar inversiones para obtener beneficios comprando a un precio y vendiendo a otro mucho más alto, casi de inmediato.

Es evidente que el precio del crudo es una variable no controlable debido a que está sujeta a cambios generados por factores externos, sin embargo los históricos registrados permiten sugerir que éste por lo general presenta tendencias al alza; razón por la cual la inversión en bienes de capital o equipos para llevar a cabo su extracción, como lo es éste caso específico de estudio, ofrece probabilidades de ser un desarrollo exitoso.

Tabla 22. Precios promedio del barril de petróleo en Colombia

Colombia, precio del petróleo US\$ por Barril

Promedio mensual

Meses	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Meses	2009	2010
Enero	N.D.	25,12	16,96	12,36	26,71	29,53	19,57	32,92	34,21	46,92	64,96	54,93	93,01	Enero	41,24	78,46
Febrero	18,90	22,41	16,22	12,02	29,15	26,68	20,58	35,61	35,61	48,07	62,12	59,19	94,73	Febrero	38,84	75,98
Marzo	21,07	20,91	15,02	14,44	26,92	27,41	24,10	33,74	36,59	54,56	62,83	60,31	105,58	Marzo	47,41	81,02
Abril	23,45	19,75	15,48	17,33	25,72	27,26	26,16	28,51	36,70	53,17	70,16	63,93	118,87	Abril	49,59	
Mayo	21,39	20,81	14,79	17,77	29,03	28,59	27,05	27,94	40,30	49,93	70,79	63,66	125,72	Mayo	58,52	
Junio	20,24	19,25	13,96	17,69	31,36	27,77	25,49	30,62	38,06	56,37	70,90	67,47	133,20	Junio	70,75	
Julio	21,37	19,65	14,17	20,00	29,90	26,52	26,87	30,61	40,71	59,00	74,54	73,82	134,34	Julio	64,21	
Agosto	21,81	19,91	13,40	21,14	30,97	27,25	28,20	31,48	44,88	64,95	73,01	72,59	117,12	Agosto	71,15	
Septiembre	23,88	19,71	14,77	23,66	33,65	26,08	29,36	28,53	45,85	65,62	63,77	78,82	104,90	Septiembre	68,82	
Octubre	24,80	21,44	14,46	23,03	33,04	22,21	28,93	30,32	53,09	62,19	59,06	85,05	77,13	Octubre	75,45	
Noviembre	23,58	20,10	12,85	24,81	33,97	19,55	26,36	30,92	48,55	58,34	59,32	94,93	57,14	Noviembre	78,14	
Diciembre	25,13	18,37	11,31	26,03	28,21	19,30	29,00	32,02	43,11	59,49	62,42	91,33	41,32	Diciembre	74,53	

Teniendo una visión global de la primer variable a comparar, procedemos a establecer los parámetros de operación alcanzados en relación al consumo eléctrico, tiempos y capacidad de producción del equipo.

En primer lugar el sistema maneja una potencia de conexión igual a **0.75KW**, valor determinado por el motor eléctrico, calculado para cumplir con las especificaciones del diseño. Trabajando hasta una profundidad máxima de **3280 pies** (1000 metros) y mínima desde un valor cualquiera de profundidad determinado por viajes de prueba, se establece un nivel inicial de recuperación a **333 pies** (aproximadamente 100 metros), con una velocidad promedio de **0.65 m/s**. Lo cual se calcula del siguiente modo:

$$V_{prom} = \frac{V_{max} + V_{min}}{2} = \frac{0.72 + 0.58}{2} = 0.65 \frac{m}{s}$$

$$Tiempo\ de\ descenso = \frac{\text{profundidad inicial de recuperación}}{V_{prom}}$$

$$Tiempo\ de\ descenso = \frac{100}{0.65} = 153.8\ seg$$

Para un mismo nivel de profundidad:

$$Tiempo\ de\ descenso = tiempo\ de\ ascenso$$

Por tanto:

$$Tiempo\ de\ 1\ ciclo = 2\ tiempos\ de\ desplazamiento = 2 \times 153.8 = 307.6\ seg$$

De este modo, descartando los cortos tiempos de duración de las etapas de recogida y descarga, frente a los empleados en el descenso y la elevación, tenemos que:

$$1 \text{ dia} = 24 \text{ hr} = 86400 \text{ seg}$$

$$\# \text{ ciclos} \times \text{dia} = \frac{\text{duración de 1 dia}}{\text{tiempo 1 ciclo}} = \frac{86400}{307.6} = 281 \text{ ciclos}$$

Por diseño el sistema está en capacidad de recoger **6.87** litros por ciclo, correspondientes al volumen fijo del colector.

Por tanto:

$$\text{extracción diaria} = (\# \text{ ciclos por dia}) \times (\text{Vol. extraido por ciclo})$$

$$\text{extracción diaria} \approx 281 \times 6.87 = 1930.5 \text{ litros} \qquad 1 \text{ barril} = 159 \text{ litros}$$

Lo cual corresponde a un valor de aproximadamente **12.13** barriles diarios.

Tenemos entonces que las variables de interés están determinadas en los siguientes valores promedios.

- Potencia de entrada = **0.75** kw
- Capacidad de recuperación promedio = **12** barriles

De esta forma podemos establecer un costo de funcionamiento, frente a una utilidad promedio

$$\text{costo de operación dia} = \text{potencia consumida} \times \text{costo de } \frac{\text{KW}}{\text{h}} \times \text{tiempo oper.}$$

$$\text{costo de operación día} = 0.75KW \times \frac{\$250KW}{h} \times 24\text{horas} = \$4.500 \text{ diarios}$$

En tanto que una producción diaria de aproximadamente 12 barriles cotizados en un promedio de **80 USD**. Por tabla 22, representan una ganancia de **960 USD** diarios, equivalentes alrededor de **\$1'824.000** pesos Colombianos, cotizando la divisa americana en un valor de \$1.900; lo cual muestra la rentabilidad en la operación del sistema.

7.2 RENTABILIDAD Y EFICIENCIA ALCANZADA

Un proyecto como el desarrollado es en últimas una iniciativa empresarial de negocio cuya meta es la obtención de un retorno económico superior o igual al esperado inicialmente, utilizando como herramientas la debida planeación, organización, ejecución y seguimiento de actividades así como un proceso de evaluación de posibles riesgos para garantizar el cumplimiento del objetivo básico planteado. Para asegurar el alcance de estas condiciones, es necesario que el proyecto demuestre éxito y rentabilidad, por tal razón sus costos operativos deben ser menores que la ganancia obtenida, tal como se determinó en cálculos anteriores.

De este modo, el sistema con un costo diario de operación igual a **\$4.500** y una ganancia de **\$1'824.000** presenta una alta rentabilidad, del orden del **405%** obtenida como la razón entre la utilidad neta y la inversión hecha para obtener dicha utilidad. De igual forma el sistema presenta una alta eficiencia, en la operación, específicamente en el componente motriz, que empleando solamente **0.306 Hp**. Realiza efectivamente la elevación, y emplea un mínimo de potencia extra para cubrir pérdidas por fricción.

7.3 COSTOS DE DESARROLLO

Para finalizar éste análisis concerniente a los costos globales en los que se ha incurrido desarrollando el sistema para la reactivación de pozos de hidrocarburo abandonados, se presentan a continuación en la siguiente tabla los valores generales por concepto de componentes y procesos realizados.

Tabla 23. Costos globales de desarrollo del sistema

COMPONENTE	COSTO	PROCESO	COSTO
CILINDRO BASE BRIDADO	\$100.000	CORTES DE LAMINAS Y PERFILES METÁLICOS	\$200.000
VÁLVULA DE SEGURIDAD EN BOCA DE POZO	\$1'500.000		
CILINDRO SOPORTE BRIDADO	\$200.000		
CILINDRO GUÍA VERTICAL	\$100.000		
CABEZAL DE DIRECCIONAMIENTO	\$300.000	OPERACIONES DE TALADRADOS	\$100.000
CILINDRO DE DESCARGA	\$130.000		
CONO DE RETENCIÓN	\$70.000		
MANGUERA DE CONDUCCIÓN A TANQUE	\$50.000	OPERACIONES DE FRESADOS	\$400.000
SOPORTES DE CILINDRO DE DESCARGA	\$200.000		
SOPORTE PARA POLEA DE APOYO SUPERIOR	\$120.000		
TANQUE DE ALMACENAMIENTO	\$150.000	SOLDADURA MIG	\$100.000
CABLE DE ELEVACIÓN	\$650.000		
MARCO BASE DEL COMPONENTE MOTRIZ	\$400.000		
TRANSMISIÓN FLEXIBLE	\$390.000	OTROS (PULIDOS, DESVASTES, ETC)	\$200.000
TAMBOR DE ARROLLAMIENTO	\$220.000		
MOTOR ELÉCTRICO DE 1 HP.	\$520.000		
TABLERO DE CONTROL	\$250.000		
COLECTOR DE RECUPERACIÓN	\$80.000		
CONTRAPESO DE SUMERGENCIA	\$30.000		

Lo cual arroja un costo de fabricación del sistema por **\$6'460.000**.

8. ALCANCES DEL SISTEMA

Además del claro propósito que tiene el sistema extendiendo la vida útil de pozos marginales o de baja producción, presenta otras posibilidades y ventajas que lo destacan aún más; estas son:

- Llevar a cabo test y muestreo de pozos
- Reemplazar equipos tradicionales que se tornan ineficientes en pozos de baja producción
- Reducir al máximo el límite económico de un pozo
- Bajo costo en la construcción del sistema, debido a los pocos elementos y componentes que involucra en su manufactura, así como materiales económicos en que estos se encuentran elaborados; lo que implica una inversión inicial baja y recuperable al poco de tiempo de entrar en operación el equipo.
- Bajo costo operativo, obtenido de un diseño sencillo y eficiente, que minimiza las entradas energéticas al sistema y maximiza la producción con las mismas.
- Procedimiento de montaje e instalación rápido y sencillo, de pocos componentes y conexiones.
- Bajas dimensiones en términos generales y poco peso que facilitan su transporte a la zona de extracción.
- Bajos requerimiento de mantenimiento, reducidos a la inspección periódica del cable de elevación, configuración de la manguera colectora y estado de filtros.
- Operación confiable, conseguida mediante la implementación de componentes y elementos de seguridad apropiados.

CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un sistema *no convencional* para llevar a cabo la *reactivación* de pozos abandonados, marginales o de baja presión, mediante la extracción del hidrocarburo que se encuentra remanente en su interior, operando en base al principio de funcionamiento de un aljibe, con capacidad de llevar a cabo la recuperación de aproximadamente 12 barriles de crudo en 24 horas trabajando hasta una profundidad máxima de 1000 metros y empleando una potencia eléctrica de 0.75 KW.

Una posible implementación permanente en campo de un equipo como el diseñado permitirá la reactivación de zonas potencialmente muy productivas que aún mantienen volúmenes de hidrocarburo que pueden ser extraídos a un bajo costo, prolongando al *máximo* su estado activo y generando *progreso y crecimiento económico* para nuestra nación.

Los costos operativos en los cuales incurre el sistema por su funcionamiento son muy inferiores a las ganancias producto del crudo recuperado, lo que se ve reflejado en un alto margen de *rentabilidad*.

La *versatilidad* en el diseño del sistema permite modificaciones en los elementos que son enviados al interior del pozo, lo cual otorga cualidades o mayores alcances que permiten sugerir el diseño como base de partida para nuevos equipos en la industria del petróleo.

En razón al diseño sencillo y efectivo del sistema se tienen costos muy bajos de fabricación frente a los beneficios que ofrece el equipo, lo cual favorece una eventual *comercialización* del mismo.

RECOMENDACIONES

Se sugiere llevar a cabo un estudio de la posibilidad de aprovechamiento del gas descartado por el sistema, con la intención de aprovechar este subproducto y evitar su descarte directo al medio ambiente.

Se recomienda complementar el análisis realizado, con un estudio donde se contemple el impacto ambiental y social que causaría la implementación en campo de un sistema como el que ha sido diseñado y construido, con el fin de estimar el efecto o recibimiento de esta nueva tecnología por parte de las poblaciones o personas que habitan en dichas zonas.

Durante el ejercicio se analizó el precio del petróleo y su impacto sobre la viabilidad y rentabilidad del proyecto, presentando un comportamiento variable y no controlable por lo que genera un riesgo remoto de una operación que se torne no rentable; por tanto ante una eventual industrialización de la idea innovadora, se debe hacer un estudio en profundidad de las tendencias económicas del mercado, para asegurar de este modo una comercialización exitosa.

BIBLIOGRAFÍA

HAMROCK, Bernard J. Diseño de elementos de máquinas. Mac Graw hill.

ASKELAND, Donald. Ciencia e ingeniería de los materiales. Internacional Tomsosn Editorial.

DUBBEL, H. Manual del constructor de máquinas. Barcelona: Editorial Labor, 1965. v.2, 1040 p.

MOTT, Robert L. Diseño de elementos de máquinas. Mac Graw hill.

HIBBELER, Rusell C. Mecánica de materiales. Ed Continental, S.A. 1994

DRUCKER TACHAU, John E. Theory of wire rope. Englewood Cliffs, NJ. : Prentice-Hall Internacional, 1973. 454 p.

PAVCO S.A. Catálogo de Selección de Tubería en PVC

SHIGLEY, Joseph E. Manual de Diseño Mecánico. McGraw Hill. 2003. 987 p

STRATTA, María Eugenia. La información Sobre Precios de Petróleo Crudo. Biblioteca del Instituto Argentino del Petróleo y del Gas. Buenos Aires, 2007

PRIAS, GUILLERMO. Estadísticas Volumétricas de la Industria Petrolera. Colombia. 2007 y 2008.

ECOPETROL S.A. El Petróleo y su Mundo. Comunicaciones Externas, 2008.

ROJAS GARCÍA, Sergio. Evaluación Financiera de Proyectos de Inversión. ECOPETROL S.A., 2008.

DINGLIANG, Yu. Colombia Busca este Año Desarrollar Industria Petrolera. Bogotá, 2007.

REPÚBLICA DE COLOMBIA MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. La cadena del Petróleo en Colombia. 2007

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. El Mercado Energético Colombiano. 2007

ESPER, Julio. El Petróleo. Bogotá, 2006

ESPARZA, Luz Elena. Impacto Económico y Ecológico del Petróleo. Tesis de Grado de Química. Universidad Industrial de Santander. 2004

BP. BP Statistical Review of World Energy. 2007

Referencias en Internet:

<http://www.siemens.com>: Página Web de Siemens, fabricante de sistemas de potencia.

<http://www.danfoss.com>: Página Web de Danfoss, fabricante de variadores de velocidad.

<http://www.chenyang.com>: Página Web de Chen Yang Inc, fabricante de sensores.

<http://www.nymex.com>: Página Web de NYMEX, utilizada para revisar la cotización del Precio del Petróleo.

ANEXOS