



ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECÁNICA**

AUTOR: ROMERO CHAVEZ, JUAN SEBASTIAN--

**TEMA: REDISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DE UN EQUIPO DE BOMBEO
MECÁNICO DE PETROLEO CON CAPACIDAD DE 40 kib.**

DIRECTOR: ING. BORYS CULQUI, MSC

CODIRECTOR: ING. CHRISTIAN NARVAEZ, MSC

SANGOLQUÍ, AGOSTO 2015

CERTIFICADO DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “**REDISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DE UN EQUIPO DE BOMBEO MECÁNICO DE PETROLEO CON CAPACIDAD DE 40 klb**” fue realizado en su totalidad por el señor Juan Sebastián Romero Chávez, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniería Mecánica.



Ing. Borys Culqui

DIRECTOR



Ing. Christian Narváez

CODIRECTOR

Sangolquí, 2015-08-12

AUDITORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **JUAN SEBASTIAN ROMERO CHAVEZ**

DECLARO QUE:

La tesis / proyecto de grado titulado “**REDISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DE UN EQUIPO DE BOMBEO MECÁNICO DE PETROLEO CON CAPACIDAD DE 40 kib**”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas y notas que constan en los párrafos correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis/ proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 12 de agosto del 2015



Juan Sebastián Romero Chávez

1714548508

AUTORIZACIÓN

Yo, JUAN SEBASTIAN ROMERO CHAVEZ

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del proyecto de grado titulado **“REDISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DE UN EQUIPO DE BOMBEO MECÁNICO DE PETROLEO CON CAPACIDAD DE 40 klb”**, cuyo contenido, ideas, criterios y conceptos, son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 12 de agosto del 2015



Juan Sebastián Romero Chávez

1714548508

DEDICATORIA

Durante todo este tiempo de estudio, con este proyecto, se termina una etapa crucial en mi vida, que ha tenido altos y bajos, los cuales se han sabido disfrutar y sobreponerse en base a esfuerzo, dedicación y apoyo incondicional de personas valiosas que me han rodeado durante todo este período.

La culminación de este proyecto que derivan en la obtención del título de Ingeniero Mecánico, se la dedico especialmente a mis padres y hermana, que de una u otra manera supieron apoyarme incondicionalmente en las decisiones tomadas para seguir adelante.

A mi familia, quienes siempre aportaron con su granito de arena, apoyándome cada uno a su manera, enriqueciéndome en mi formación personal, lo que me ha ayudado ser una mejor persona cada día.

A mis amigos y compañeros, tanto de carrera como del colegio, quienes sin duda fueron un pilar fundamental para el logro de esta meta, ya que sin ellos el tiempo de estudio hubiera sido un martirio día a día.

Juan Sebastián Romero Chávez

AGRADECIMIENTOS

Al terminar este proyecto, agradezco a Dios y a la virgen Dolorosa, por darme la capacidad, sabiduría, paciencia para afrontar cada uno de los obstáculos que se presentaron durante el largo camino de desarrollo del proyecto.

Agradecer a mis padres, quienes me dieron desde un principio todo tipo de facilidades para poder cumplir a cabalidad cada una de las etapas del proyecto.

Agradecer a mis amigos y profesores, quienes estuvieron siempre pendientes en el desarrollo del proyecto y junto con ellos, poder culminar de manera satisfactoria esta etapa de la vida.

Por ultimo dar un agradecimiento a la empresa auspiciante del proyecto de tesis, Halliburton Latin America S.R.L, al área de Artificial Lift, especialmente al Ingeniero Rolando Ortega, quien de una manera desinteresada puso la confianza en mí, y me brindó la oportunidad de realizar este proyecto dándome todas las facilidades del caso para poder realizarlo de la mejor manera.

Juan Sebastián Romero Chávez

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1.....	1
1. GENERALIDADES	1
1.1 ANTECEDENTES.-	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	5
1.3 JUSTIFICACIÓN	6
1.4 ALCANCE DEL PROYECTO	7
1.5 OBJETIVO GENERAL	7
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
CAPITULO 2.....	8
2. MARCO TEORICO	8
2.1 ANTECEDENTES DEL BOMBEO MECÁNICO	8
2.1.1 TIPOS DE BOMBEO UTILIZADOS EN ECUADOR.....	9
2.1.1.1 BOMBEO HIDRUALICO.....	9
2.1.1.2 BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE (ESP)	14
2.1.1.3 BOMBEO MECANICO.....	19
2.1.1.3.1 PARTES PRINCIPALES DE LA ESTRUCTURA DE LA UNIDAD DE BOMBEO MECANICO	21
2.1.1.3.2 DESCRIPCION DEL PROCESO DE BOMBEO MECANICO.....	23
2.1.1.3.3 EQUIPO DE BOMBEO CONVENCIONAL.....	26
2.1.1.3.4 EQUIPO DE BOMBEO MARK II.....	27
2.1.1.3.5 EQUIPO DE BOMBEO BALANCEADA POR AIRE	29
2.1.1.3.6 ROTAFLEX	31
2.2 EQUIPO DE BOMBEO MECÁNICO ACTUAL.....	34
2.3 ESPECIFICACIONES GENERALES DEL EQUIPO DE BOMBEO MECÁNICO ACTUAL.....	37

2.4	RESUMEN COMPARATIVO ENTRE TIPOS DE BOMBEO PETROLEO UTILIZADOS EN ECUADOR	37
2.5	ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN POZO PRUEBA CON DIFERENTES TIPOS DE EQUIPOS DE BOMBEO MECÁNICO DE PETROLEO	38
CAPITULO 3.....		39
3.	DISEÑO Y ENFOQUE NUMÉRICO.	39
3.1	DISEÑO POR TENSION	39
3.2	DISEÑO A COMPRESIÓN	41
3.3	DISEÑO A FLEXIÓN	43
3.4	DISEÑO A FATIGA	45
3.5	ENFOQUE NUMERICO	46
3.6	SIMULACIÓN	50
CAPITULO 4.....		51
4.	CÁLCULOS, SIMULACIÓN Y RESULTADOS	51
4.1	CÁLCULO MEDIANTE TEORÍA DE ARMADURAS METÁLICAS CON ELEMENTOS FINITOS.	52
4.1.1	CÁLCULO DE REACCIONES RB Y RCx	58
4.1.2	CÁLCULO DE ESFUERZOS	60
4.1.2.1	PROCEDIMIENTO DE CONVERGENCIA DE RESULTADOS EN BASE AL MALLADO	60
CAPITULO 5.....		68
5.	OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA ACTUAL.	68
5.1	OPTIMIZACIÓN POR RIGIDIZADORES	68
5.2	OPTIMIZACIÓN POR ENCAJONAMIENTO	70
5.3	EVALUACION ECONOMICA DE LA OPTIMIZACION	72
5.4	COMPARACION OPTIMIZACION – COSTO	74
CAPITULO 6.....		75

6.	REDISEÑO	75
6.1	ESPECIFICACIONES DEL REDISEÑO	76
6.2	PROCESO DE REDISEÑO	76
6.2.1	ELECCION DE ALTERNATIVAS	79
6.3	SIMULACION DE REDISEÑO	81
6.4	FACTOR DE SEGURIDAD	82
6.4.1	CALCULO DE FACTORES DE SEGURIDAD	82
6.5	PLANOS Y TOLERANCIAS	83
6.6	PRESUPUESTO DEL REDISEÑO	83
6.6.1	ANALISIS DE COSTOS DE LA ESTRUCTURA ACTUAL	84
6.6.2	ANALISIS DE COSTOS DEL REDISEÑO DE LA ESTRUCTURA	86
6.6.3	COMPARACION REDISEÑO - COSTO	89
	CAPITULO 7.....	90
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
7.1	CONCLUSIONES.....	90
7.2	RECOMENDACIONES.....	92
8.	BIBLIOGRAFIA	94
9.	ANEXOS	95
9.1	ANEXO 1 – PLANOS DE OPTMIMIZACION	95
9.2	ANEXO 2 – PLANOS DE REDISEÑO	96
9.3	ANEXO 3 – CATALOGO DE PERFILES UPN DIPAC.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Esquema de equipo de bombeo mecánico "Balancín"</i>	2
<i>Figura 2: Equipo de Bombeo Mecánico Halliburton</i>	3
<i>Figura 3: Falla en la viga de anclaje</i>	6
<i>Figura 4: Bomba Jet de Sertecpet (Sertecpet, s.f.)</i>	11
<i>Figura 5: Equipo de Superficie de Bombeo Hidráulico de Sertecpet (Sertecpet, s.f.)</i>	13
<i>Figura 6: Motor Eléctrico</i>	15
<i>Figura 7: Disposición Cables de Potencia</i>	18
<i>Figura 8: Clasificación de unidades de bombeo comúnmente utilizados.</i>	19
<i>Figura 9: Bomba de Profundidad</i>	20
<i>Figura 10: Partes Principales de una Unidad de Bombeo Mecánico Convencional</i>	21
<i>Figura 11: Partes de la Viga Viajera (Norma API 11E, 2008)</i>	22
<i>Figura 12: Carta Dinamométrica</i>	26
<i>Figura 13: Carreras de la Unidad de Bombeo Mecánico Convencional</i>	27
<i>Figura 14: Ejemplo de Carta Dinamométrica usando los datos de Posicion de la Varilla Pulida (Norma API 11E, 2008)</i>	28
<i>Figura 15: Unidad de Bombeo Balanceada por Aire</i>	30
<i>Figura 16: Partes de la Unidad Rotaflex</i>	33
<i>Figura 17: Equipo de Bombeo Mecánico Actual</i>	35
<i>Figura 18: (a) Distribución de Esfuerzos Uniforme (b) distribución de Esfuerzos no Uniforme (Rodriguez, 2006)</i>	40
<i>Figura 19: Relación de Esbeltez (AISC, 2005)</i>	42
<i>Figura 20: Diagrama de Cuerpo Libre</i>	51
<i>Figura 21: Diagrama de Cuerpo Libre del Pistón Principal</i>	52
<i>Figura 22: Diagrama de Elementos Finitos</i>	53
<i>Figura 23: Cálculo mediante software de elementos finitos</i>	57
<i>Figura 24: Comparación de resultados de cálculos de la columna</i>	58
<i>Figura 25: Diagrama de fuerzas en reacción C</i>	59

<i>Figura 26: a) estructura modelada con cargas, b) estructura con nodos liberados de pines, c) estructura deformada por acción de las cargas</i>	59
<i>Figura 27: Esquema de fuerzas sobre la estructura base</i>	60
<i>Figura 28: Condiciones de apoyo de la estructura</i>	61
<i>Figura 29: Puntos de Análisis 1 y 3</i>	62
<i>Figura 30: Punto de Análisis 2</i>	62
<i>Figura 31: Punto de Análisis 4</i>	63
<i>Figura 32: Convergencia de esfuerzos en el punto 1.</i>	64
<i>Figura 33: Convergencia de esfuerzos en el punto 2</i>	65
<i>Figura 34: Convergencia de esfuerzos en el punto 3</i>	65
<i>Figura 35: Convergencia de esfuerzos en el punto 4</i>	66
<i>Figura 36: Convergencia de factor de seguridad en los 4 puntos de análisis</i>	66
<i>Figura 37: Mallado de la Estructura</i>	67
<i>Figura 38: Tipos de rigidizadores a) soldado al ala a tracción b) soldado en el alma con espacio en ala inferior, c) rigidizador hueco de ratón</i>	68
<i>Figura 39: Ensayo 1: rigidizador hueco de ratón</i>	69
<i>Figura 40: Ensayo 2: rigidizador espacio ala inferior</i>	69
<i>Figura41: Ensayo 3: rigidizadores espacio ala inferior con menos espacio entre rigidizador</i>	69
<i>Figura 42: Nueva zona de esfuerzos generada después del encajonamiento</i>	71
<i>Figura 43: Optimización de la estructura</i>	72
<i>Figura44: Identificación de bastidor principal y secundario</i>	75
<i>Figura 45: Especificación de ubicación de viga de apoyo eliminada en el rediseño</i>	77
<i>Figura 46: Identificación de apoyo tipo 1.</i>	78
<i>Figura47: Ubicación de los apoyo tipo 2.</i>	78
<i>Figura48: Encajonado en vigas laterales</i>	79

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2-1: Descripción del ciclo de bombeo.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 2-2: Resumen Comparativo entre Tipos de Bombeo Utilizados en Ecuador</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 2-3: Análisis Comparativo entre Tipos de Equipos Bombeo Mecánico Petróleo.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 4-1: Ensamble de la Matriz General de Rigidez</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 4-2: Comparación de Desplazamientos de Cálculos teóricos y software de elementos finitos ..</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 4-3: Convergencia de Esfuerzos Según el Mallado</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 5-1: Detalle de opciones de optimización.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 5-2: Detalles de opciones del rediseño</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 5-3: Detalle de costos de materiales de estructura original</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 5-4: Detalle de costos de mano de obra de estructura original</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 5-5: Detalle de costos de equipo de estructura original</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 5-6: Detalle de costos de transporte de estructura original.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 5-7: Detalle de costos indirectos.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 5-8: Detalle de costo total de estructura original.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 5-9: Detalle costos de materiales de estructura optimizada.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 5-10: Detalle de costos de mano de obra de estructura optimizada.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 5-11: Detalle de costos de equipos utilizados en la estructura optimizada</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 5-12: Detalle de costos de transporte de estructura optimizada</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 5-13: Detalle de costos indirectos</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 5-14: Detalle de costo total de estructura optimizada</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 5-15: Detalle de costos de materiales del rediseño de la estructura.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 5-16: Detalle de costos de mano de obra utilizada en el rediseño de la estructura.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 5-17: Detalle de costos de equipos utilizados en el rediseño de la estructura.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 5-18: Detalle de costos del transporte del rediseño de la estructura</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 5-19: Detalle de costos indirectos</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 5-20: Detalle de costo total del rediseño</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 5-21: Comparación mejora – costo.....</i>	<i>89</i>

INDICE DE ANEXOS

<u>Anexo 1: Planos de la optimización</u>	73
<u>Anexo 2: Planos del Rediseño</u>	94
<u>Anexo 3: Catalogo de perfiles UPN DIPAC</u>	95

RESUMEN

El proyecto de titulación presentado, comprende el rediseño de una estructura de un equipo de bombeo mecánico de petróleo requerido por la empresa Halliburton Latin America S.R.L., para prevenir una futura falla en la estructura y que soporte una carga de 40 Klb. El rediseño realizado se basó en un análisis estructural de un equipo de bombeo mecánico de petróleo por medio de simulación en software de elementos finitos; simulación la cual fue validada mediante la generación de un programa en base a los criterios de teoría de armaduras metálicas. De la misma manera se valida los valores obtenidos en la simulación, validando la malla que genera el software, obteniendo una convergencia de valores tanto en esfuerzo como en valores de factor de seguridad. La simulación determina 4 puntos críticos en los cuales la estructura presenta los valores de esfuerzos más altos, de los cuales el rediseño se enfoca en dos de ellos, teniendo en cuenta que los dos restantes descartados son concentradores de esfuerzo y generan valores erróneos por parte del software. De esta forma se presentan dos opciones; optimización de la estructura actual mediante encajonamiento de los perfiles en I de las zonas críticas determinadas, para una mejora de las estructuras que actualmente estén funcionando dentro o fuera del país y un rediseño cambiando los perfiles en I por dos perfiles doble C UNP 260 soldados, formando una geometría rectangular con lo que se mejora la resistencia de la estructura en más del 50%, propuesta la cual deberá ser analizada por la empresa para un futuro cambio en la producción de los equipos de bombeo mecánico. Las dos propuestas presentadas, tanto la optimización como el rediseño cumplen con el principal requerimiento de soportar una carga de 40 Klb., y mediante un análisis económico dentro del país, las dos propuestas son viables ya que la inversión es mínima, tomando en cuenta el beneficio que se va a obtener en la mejora de resistencia de los perfiles.

Palabras clave: REDISEÑO ESTRUCTURAL, ELEMENTOS FINITOS, SIMULACION, CONVERGENCIA DE RESULTADOS.

ABSTRACT

The graduation project presented comprises the redesign structure of a team of mechanical pumping oil required by Hallibuton Latin America SRL, to prevent future failure in the structure and support of a load of 40 k. The redesign was based on a structural analysis of a team of mechanical pumping oil through simulation finite element software; simulation which was validated by generating a program based on the criteria of theory of metal structures. Similarly the values obtained in the simulation are validated by the the mesh generated in the software, obtaining a convergence of values both in effort and safety factor values. The simulation determines four critical points at which the structure has values of higher stress, of which the redesign will focus on two of them, given that the other two are discarded as stress concentrators and generates error values by the software. Thus two options are presented; optimization of the current structure by boxing I-sections as determined critical areas for improving the structures that are currently operating in or outside the country and changing redesigned I-sections for two double C profiles UNP 260 welded, forming a rectangular geometry that strengthens the structure by more than 50%, a proposal which should be analyzed by the company for a future change in the production of mechanical pumping equipment. The two proposals, both optimization and redesign fulfill the main requirement of supporting a load of 40 k. Through an economic analysis within the country, the two proposals are feasible because the investment is minimal, considering the benefit to be obtained in improving resistance profiles.

Keywords: Structural redesign, Finite elements, Simulation, Convergence of results

INTRODUCCION

El crecimiento en la implementación de extracción de recursos petroleros en la región sudamericana, general que las empresas prestadoras de servicios petroleros, diseñen nuevos métodos diferentes de bombeo, lo que optimiza y mejora la extracción de recursos cada vez más.

La estandarización e implementación de estos diseños, específicamente del equipos de bombeo mecánico superficiales, ha producido que se tenga cierto tipo de inconvenientes en la parte estructural de las unidades generando paras y retrasos en producción.

La implementación de estas unidades está creciendo dentro de nuestro país gracias a las nuevas políticas gubernamentales de la extracción de petróleo en áreas que antes eran protegidas. Teniendo en cuenta las condiciones de profundidad y viscosidad de fluido a extraer en los pozos en el país, ha generado una preocupación en mejorar y solucionar los inconvenientes estructurales generados en unidades instaladas en otros pozos de Sudamérica, para prever que inconvenientes y tener más confiabilidad en las unidades que sean instaladas dentro del Ecuador.

Para solucionar los inconvenientes estructurales de la unidad, se aplican varios conceptos de ingeniería, los cuales, dan las pautas para la propuesta de las posibles mejoras a realizar y optimizar la estructura, y de la misma forma ayudan a la de toma de decisiones y de aceptación de la mejor opción planteada a implementarse en el rediseño.

CAPITULO 1

1. GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES.-

La empresa Halliburton Latin America S.A. LCC., cuenta con 13 líneas de servicio de producto (Product Service Lines). Las líneas de servicio del producto se dividen en dos grupos: Perforación y Evaluación (D&E), y Acabado y Producción (C&P). El área de Consultoría y Gestión de Proyectos de las líneas de servicio del producto trabajan conjuntamente con las dos divisiones haciendo un servicio integrado.

La División de Completaciones y Producción se encarga de la cementación, estimulación, intervención del pozo, control de presión, tuberías y servicios de procesos, y los servicios de terminación, por esta razón tienen varias sub líneas de servicio de productos detalladas a continuación:

- Levantamiento Artificial (Artificial Lift)
- Herramientas de Completación (Completion Tools)
- Boots & Coots
- Multi-Chem
- Cementación (Cementing)
- Mejoramiento de la Producción (Production Enhancement)

El procedimiento para la extracción de petróleo comienza con un estudio previo de la estructura interna de la tierra, para saber si una región es apta para la formación del petróleo y determinar exactamente que hay bajo la superficie; de esta manera se crea el pozo petrolero realizando largas perforaciones a través de las capas geológicas hasta dar con el yacimiento petrolífero.

En la superficie se coloca la maquinaria que regula el flujo de petróleo ya que en el yacimiento existe una presión suficiente para que el petróleo salga a la superficie. Esto sucede hasta que esta presión baja a medida que el yacimiento se vacía, entonces se comienza una segunda etapa de extracción

la cual consiste en inyectar agua, aire, dióxido de carbono o vapor para aumentar la presión interna y obtener el petróleo, pero para acelerar la salida del petróleo se utiliza mecanismos de bombeo mecánico. Este proceso se denomina Levantamiento Artificial (Artificial Lift).

La División de Levantamiento Artificial, de la empresa Halliburton Latin America S.A. LCC., cuenta con tres métodos de levantamiento:

1. Levantamiento por bombas eléctricas sumergibles (ESP)
2. Levantamiento por bombas de cavidad progresiva (PCP),
3. Levantamiento por bombas de varilla de superficie (SRP)

El método de levantamiento artificial más común utilizado a nivel mundial en los pozos de extracción de petróleo (alta viscosidad), es el de Bombeo Mecánico (SRP), en donde el sistema convencional es energizado por medio de un motor conectado a una caja reductora de velocidad conectada mediante poleas para movilizar el sistema viga-balancín como se muestra a continuación en la Figura 1

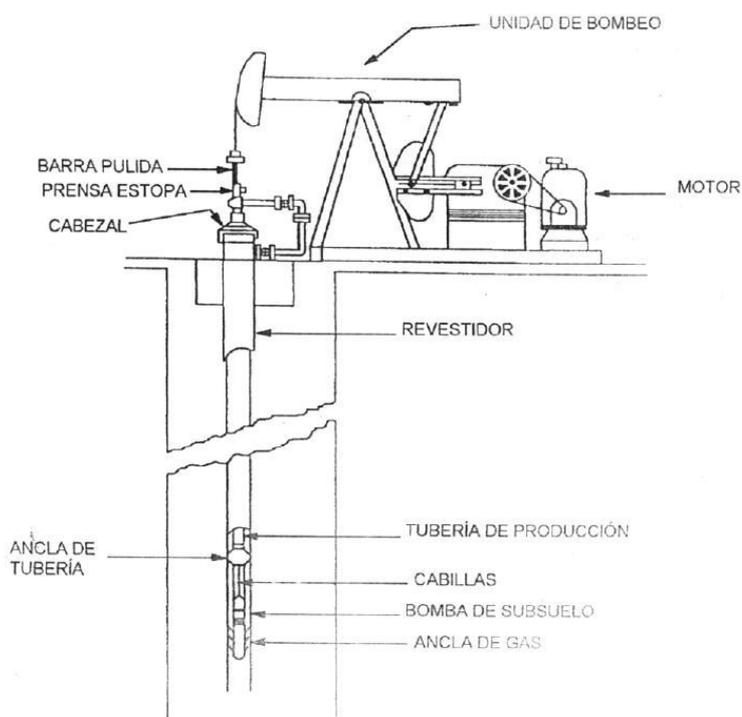


Figura1: Esquema de equipo de bombeo mecánico "Balancín" (oilMail, s.f.)

En la actualidad la empresa Halliburton Latin America S.A. LCC., está cambiando el bombeo tradicional de varilla por un equipo de bombeo mecánico con una configuración diferente (Figura 2), con lo cual se espera tener una mejor producción de petróleo y mejor adaptabilidad a las diferentes condiciones a las que los pozos trabajan y de esta forma reemplazar los antiguos sistemas de bombeo mecánico convencionales por otros más eficientes y a un menor costo de producción, obteniendo de esta forma un mayor ingreso para la empresa.



Figura 2: Equipo de Bombeo Mecánico Halliburton

(Halliburton, 2013)

Las principales características del equipo de bombeo mecánico son:

- Facilidad en el transporte e instalación rápida en cualquier pozo de bombeo mecánico.

- Carrera ultra larga de velocidad variable, ajustable en tiempo real, se autoajusta al fluido dinámico del pozo para optimizar su desempeño.
- Software de control integrado PUMP-OFF, censa las condiciones de fondo y cambia los niveles de carga, ajustando la velocidad de la unidad para mantener un nivel estable.
- Reduce la fatiga de varillas, así como deterioro de varilla y tubing, lo cual se refleja en pocas intervenciones y tiempo inactivo.

Aplicaciones:

- Pozos con petróleo pesado/extra pesado con caudal bajo a medio (10-500 BFPD).
- Pozos con Bombeo Mecánico con problemas de falla de varilla o equipo de fondo.
- Pozos No Convencionales con perfil de rápida declinación en aporte de la formación.

Beneficios:

- Adaptable a casi todos los cabezales de pozo y sistemas de fondo.
- Fácil y económico de transportar, instalación y mantenimiento.
- Mayor Productividad por día.

El nuevo equipo de bombeo mecánico al poseer las características de poder adaptarse a cualquier tipo de pozo y a cualquier condición de fondo, tiene un diseño estandarizado desarrollado en el centro de investigación de la empresa en Houston, Texas. En Venezuela, este equipo está reemplazando al equipo de balancín, en pozos con producción activa, sin un previo estudio de funcionalidad con los parámetros y condiciones del pozo en el cual se lo va a implementar, situación que ha generado cierto tipo de fallas en especial en su estructura de soporte.

Este Proyecto de Grado de Ingeniería Mecánica tiene como finalidad el análisis de fallas de la estructura de un equipo de bombeo mecánico y plantear una propuesta de un rediseño de la misma para obtener una capacidad mayor a la actual (de 30 klb. a 40 klb.), con lo cual la empresa Halliburton, podrá

prevenir una futura falla de la estructura del equipo de bombeo mecánico no solo en Venezuela donde ya se implementaron estos equipos, sino también en Ecuador, en donde próximamente serán instalados, teniendo en cuenta que los parámetros y condiciones del pozo son más críticas que en los pozos de Venezuela.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente, la empresa Halliburton Latin America S.A. LCC., está implementando un nuevo sistema de levantamiento por bombeo mecánico en los pozos de extracción de crudo. Venezuela fue uno de los primeros países donde se lo implemento, reemplazando al equipo de bombeo por balancín, lo cual ayuda primordialmente a una mayor producción diaria (BFPD).

El equipo superficial de bombeo mecánico ha sido diseñado por el área de investigación de la empresa Halliburton en Houston, Texas, para soportar cargas cíclicas con un pico máximo de 30klb que se transmiten hacia su estructura de soporte considerando los parámetros y condiciones del pozo de petróleo estándares.

La estandarización en el diseño del equipo y la aplicación en los pozos de bombeo en Venezuela sin un previo estudio de las características del pozo en el cual se lo implementó ha producido que la estructura de soporte del equipo falle, teniendo una rotura de la viga de apoyo principales, (Figura 3), aspecto que determina el requerimiento de una investigación para la determinación de las posibles causas de falla y un rediseño de la estructura para soportar cargas cíclicas con un pico máximo de 40 klb, con la finalidad de prevenir cualquier otro tipo de falla e implementar el equipo en los pozos ecuatorianos, en donde las condiciones de los Pozos son mucho más críticas.



Figura 3: Falla en la viga de anclaje

1.3 JUSTIFICACIÓN

La implementación de los nuevos equipos de bombeo mecánico en los pozos de extracción de crudo se da por las ventajas que la misma brinda en su construcción, transporte, instalación, puesta en funcionamiento y la adaptabilidad del bombeo a las condiciones internas del pozo y del fluido a extraer, así como el incremento en la producción de barriles por día, lo cual ha producido que poco a poco se vaya reemplazando el método tradicional.

La adaptabilidad a los cabezales y sistemas de fondo ha producido que se pongan en funcionamiento estas estaciones de bombeo mecánico en los pozos ya establecidos como está ocurriendo en Venezuela y próximamente en Ecuador, pero esta implementación se da sin un estudio a fondo de las condiciones reales a las cuales va a trabajar la plataforma superficial lo que ha producido que la misma falle requiriendo por lo tanto realizar un proceso de una investigación para la determinación de posibles fallas de la estructura

superficial y un rediseño de la misma que permita tener una mayor capacidad y de esta manera prevenir una posible futura falla e implementar el equipo en los Pozos Petroleros ecuatorianos, en donde las condiciones del Pozo son más críticas.

De otra parte existe el deseo de realizar un proyecto en el que se apliquen los conceptos y principios de la Ingeniería Mecánica, específicamente de las áreas de Sistemas Hidráulicos y Neumáticos, Estructuras Metálicas, Soldadura y Diseño de Elementos; que me permitan cumplir con el objetivo de obtener el título de grado que me acredite como Ingeniero Mecánico, y me permita sustentar el desarrollo de mis actividades profesionales futuras.

1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

El análisis para la determinación de las posibles causas de falla de la estructura, contará con una simulación del funcionamiento de una unidad de bombeo bajo condiciones reales con datos obtenidos en el pozo, aspectos que permitirán conocer y contar con una pauta de las partes críticas a tomar en cuenta así como las mejoras a implementar en el rediseño de una estructura de bombeo mecánico para una capacidad de 40 klb.

1.5 OBJETIVO GENERAL

Rediseñar una estructura de bombeo mecánico para que soporte una carga de 40 klb basándose en resultados obtenidos en el proceso de análisis de falla.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Simular el comportamiento de la actual estructura de bombeo mecánico con capacidad de 30 klb para determinar posibles causas de falla.

Realizar el rediseño de la estructura de bombeo mecánico, para que tenga una capacidad de 40 klb.

CAPITULO 2

2. MARCO TEORICO

2.1 ANTECEDENTES DEL BOMBEO MECÁNICO

La producción de petróleo comienza con la identificación y exploración de áreas favorables para acumulación de petróleo, que suelen encontrarse en estructuras geológicas como anticlinales, trampas por falla y domos salinos. En estas zonas se realizan varios y diferentes estudios como son principalmente la ejecución de pozos de exploración y ejecución de pozos de evaluación.

Los estudios realizados en estos pozos instituidos se dividen en dos tipos, los geológicos y los geofísicos. Los estudios geofísicos se encargan de determinar la ubicación y naturaleza de las estructuras geológicas del suelo, utilizando varios tipos de procedimientos como:

- Prospección Gravimetría.
- Prospección Magnetometría.
- Prospección sísmica.
- Reflexión.
- Prospección fotogramétrica aéreas.

Los estudios geológicos se encargan de identificar condiciones a las cuales se formó y se acumuló con el tiempo el yacimiento, a bases de mapas de geología de superficie y características de las rocas de las diferentes capas del suelo obtenidas en los pozos de exploración.

Al tener “descubierto” el yacimiento, se determina la extensión del mismo mediante pozos de determinación o de valoración y posteriormente se pasa al proceso de perforación de pozos de desarrollo para la producción de petróleo

La producción de petróleo se realiza por desplazamiento mediante gas o agua. En un comienzo el crudo está a una presión mayor que la superficial,

la cual disminuye a medida que se extrae el petróleo.

El yacimiento tiene tres fases de vida:

La primera, cuando el petróleo fluye por su propia presión natural del yacimiento, debida al gas a presión encima del petróleo o a la presión hidráulica atrapada por debajo del gas. El flujo del petróleo crudo es controlado mediante válvulas en la superficie denominadas “árboles de navidad”.

La segunda fase, es la producción artificial o levantamiento artificial (Artificial Lift), esta se da cuando se ha disminuido la presión natural del yacimiento, lo cual hace que se empleen una variedad de técnicas como inyección de gas a presión del yacimiento y bombeo superficial, para que el pozo siga su producción, lo que hace que en la actualidad se tengan un incremento en el aprovechamiento de la capacidad del pozo de un 20 a 60%.

La tercera fase es denominada el agotamiento del pozo que se da cuando los pozos producen intermitentemente.

2.1.1 TIPOS DE BOMBEO UTILIZADOS EN ECUADOR

Dentro del país existen varios tipos de bombeo, los cuales dependen de las características de cada pozo, con lo cual se emplea el método de bombeo más adecuado con el fin de tener mayor producción de fluido por día al costo de implementación y operación menor.

Los tipos de bombeo de crudo más utilizados en el Ecuador son:

- Bombeo Hidráulico.
- Bombeo Electro Sumergible (ESP).
- Bombeo Mecánico.

2.1.1.1 BOMBEO HIDRUALICO

La historia del bombeo hidráulico se remonta a los años 1.930, en donde la primera bomba hidráulica de fondo fue instalada, la cual era una bomba de

pistón, desarrollada por la compañía Kobe, Inc. Desde este punto de partida Kobe, Inc. junto con Baker Oil Tools mejoran este sistema de bombeo hidráulico y desarrollan la bomba jet (jet pump), que mejora la producción de los pozos; el paso del tiempo provoca que las compañías se interesen en este sistema y compren las patentes hasta llegar a la época actual donde Weatherford International posee la patente para desarrollar e implementar este sistema de bombeo.

Dentro del País la implementación de este sistema de bombeo por bomba jet, es amplio, tanto para pruebas como para producción de pozos, por esta razón la empresa ecuatoriana Sertecpet ha optimizado el sistema reduciendo el número de partes que componen la bomba jet (11 partes no móviles), reduciendo de esta manera el tiempo de ensamblaje (15 minutos) y finalmente reduciendo el costo de la bomba. El precio aproximado de la renta mensual de un equipo MTU es de \$ 100.000,00.



Figura 4: Bomba Jet de Sertecpet (Sertecpet, s.f.)

El accionamiento de bombeo se realiza por medio de transferencia de energía entre el fluido de potencia y los fluidos producidos del pozo mediante el principio de Venturi; la bomba jet tiene 3 partes principales que son:

- **Boquilla:** tiene una reducción de área en donde el fluido que es inyectado a alta presión desde la superficie aumenta de velocidad y se reduce de presión.
- **Garganta:** se mezcla el fluido de potencia con el fluido producido del pozo en donde se crea una relación de presión de descarga
- **Difusor:** se reduce la velocidad del fluido combinado de retorno y aumenta la presión, la cual es suficientemente alta para levantar el fluido a la superficie.

La eficiencia de la bomba jet depende de la relación de áreas entre la boquilla y la garganta y aunque son las zonas en donde menos pérdidas de energía se tienen (1% y 8% respectivamente), son las que determinan el dimensionamiento de la bomba.

El bombeo jet es aplicable cuando se tienen pozos desviados u horizontales de profundidades entre 5.000 y 15.000 pies, alta relación gas/petróleo, fluido arenoso y corrosivo, todo tipo de crudos y pozos con un alto grado de producción de fluido desde 50 a 15.000 BFPD.

El fluido de potencia es una parte esencial en el bombeo hidráulico ya que es el que energiza la bomba jet y determina su tiempo de vida útil. Aunque se puede inyectar cualquier tipo de fluido de potencia, por lo general se inyecta agua o el mismo petróleo producido, esto depende de varios factores como si el sistema es abierto se utiliza el petróleo producido tratado químico y/o térmicamente; en sistemas cerrados se utiliza agua tratada con agentes lubricantes y anticorrosivos.

Las ventajas que posee este sistema de bombeo hidráulico vienen dado principalmente porque los componentes de la bomba no tienen partes móviles aumentando considerablemente el tiempo de vida de los componentes de fondo y requiere menos tiempo de mantenimiento en periodos más largos. En la bomba es fácilmente recuperable ya que solo se necesita una apertura y cierre de válvulas en el regulador de flujo de la superficie, con lo que se

cambia el sentido de flujo del fluido y la bomba es empujada hacia la superficie. El equipo de superficie es de tamaño reducido y móvil, con lo cual es de fácil transporte e instalación en áreas remotas.



Figura 5: Equipo de Superficie de Bombeo Hidráulico de Sertecpet (Sertecpet, s.f.)

En cuanto a las limitaciones del sistema, se tiene que el montaje de fondo del pozo depende de las condiciones de cada pozo. El equipo de superficie está constituido por líneas de alta presión (5.000 psi línea de inyección de fluido de potencia y 1.500 psi línea de retorno de fluido combinado), por lo que se tiene un riesgo mayor en la instalación y requiere monitoreo continuo. Requiere una bomba de alta presión energizada por motor eléctrico o a combustión interna con un caballaje alto (200 HP), con un consumo de energía eléctrica o combustible alto, es por esta razón que la eficiencia de todo el sistema varía de entre un 10 a 30 %.

2.1.1.2 BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE (ESP)

El sistema de bombeo electro sumergible es un método de levantamiento artificial considerado eficiente y efectivo para obtener gran producción de fluido a grandes profundidades de bombeo, con fluido pesado y en pozos con alto grado de desviación.

Este método consiste en insertar una bomba centrífuga multietapa, a la cual se la acopla un motor eléctrico, en el fondo del pozo. El motor eléctrico alimentado por cable desde la superficie, es capaz de alimentar las varias etapas de la bomba para que gracias a la rotación de los impulsores, esta levante el fluido y llegue a la superficie con la presión necesaria para llegar a su centro de almacenamiento.

El sistema completo electro sumergible consta de tres componentes principales los que incluyen el equipo de fondo, superficie y cable de alimentación. El precio promedio de un equipo BES es de \$ 550.000,00 USD.

2.1.1.2.1 EQUIPO DE FONDO

- **Guía del motor:** orienta al equipo dentro de la tubería de revestimiento y evita la oscilación del aparejo; conectado al motor o sensor de fondo.
- **Sensor de Fondo:** capaz de detectar presiones de succión y descarga, así como temperaturas del aceite del motor y de succión, vibraciones, corrientes de fuga y flujo; conectado al motor de fondo a través del cable de alimentación y de señal.
- **Motor Electro sumergible:** motor generalmente trifásico, de inducción tipo jaula de ardilla con aceite dieléctrico para enfriamiento y lubricación. En condiciones normales el motor opera a 3.500 rpm a 60 Hz o a 2.915 rpm a 50 Hz.

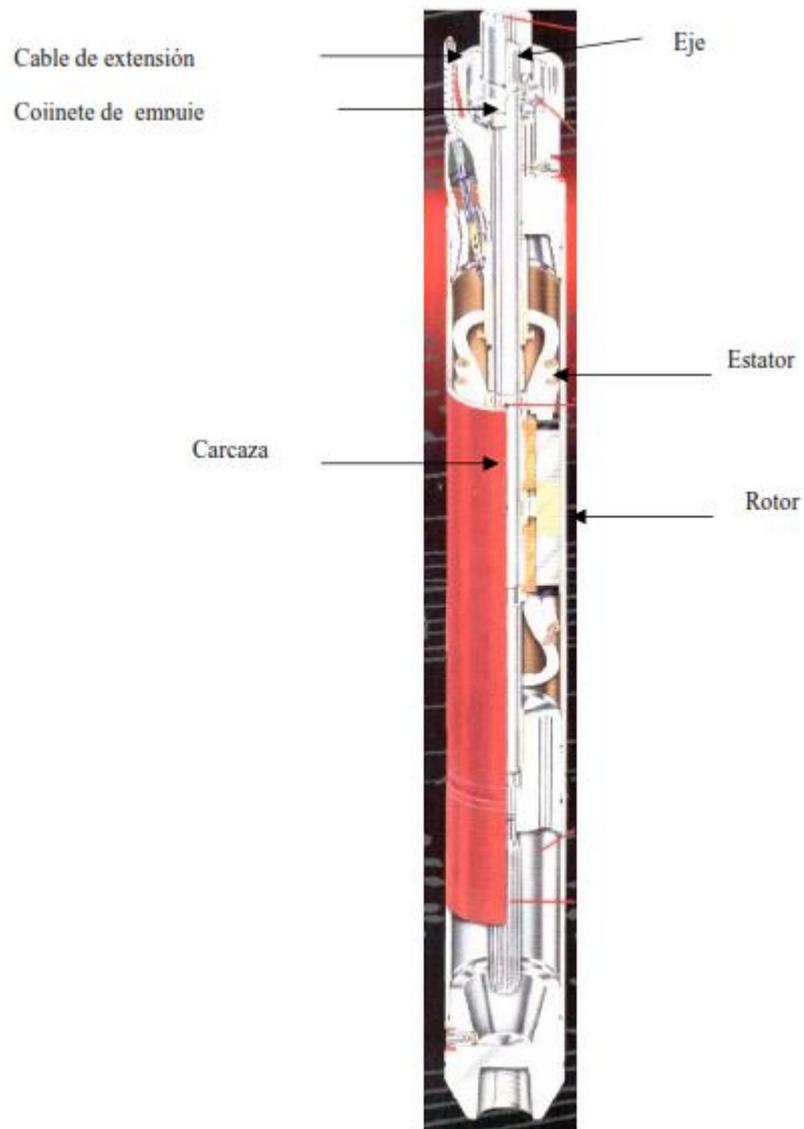


Figura 6: Motor Eléctrico

- **Sección Sellante:** es una parte vital del equipo de fondo; conecta el eje del motor con el de la bomba centrífuga. Sirve de barrera de separación o aislamiento del fluido del pozo con el aceite dieléctrico dentro del motor utilizando cámaras de bolsa o laberínticas.
- **Separador de Gas:** se presentan en pozos de alto volúmenes de gas. Existen dos tipos de separadores los estáticos o laberínticos que por su arreglo mecánico orientan al gas hacia la parte anular mientras que al fluido lo direccionan a la cámara inferior de la bomba para luego ser levantado a la superficie.

- **Bomba Electro Sumergible:** son bombas de tipo centrifugas y de varias etapas. Cada etapa consta de un impulsor y un difusor. El número de etapas de la bomba depende de la altura de bombeo a la que se requiere levantar el fluido y también determina la carga total generada y la potencia requerida en el sistema.
- **Cabeza de Descarga:** acople entre la bomba electro sumergible y la tubería de producción. Es roscado en su parte superior y sellado por medio de pernos en su parte inferior.
- **Tubería de Producción:** tubería conectada al cabezal de descarga con conexión roscada la cual es la encargada de dirigir y transportar el fluido producido hacia el cabezal del pozo.
- **Válvula de Retención:** es una válvula check que se instala arriba de la bomba centrífuga, la cual se encarga de mantener la columna llena de fluido encima de la bomba. Esta válvula previene que el fluido baje y se desplace a través del separador de gas o succión de entrada, lo que produciría giro inverso de la bomba lo que ocasionaría daños al cable de alimentación de potencia o al eje.
- **Válvula de Venteo:** facilita la migración del gas libre del fondo del pozo al espacio anular, la válvula se mantiene siempre abierta durante el sistema de bombeo está funcionando.
- **Válvula de Drenaje:** funciona conjuntamente con la válvula de drenaje. Si no se implementa la válvula de retención tampoco se instala la de drenaje ya que esta es usada para drenar el fluido dentro de la tubería y que el tubo no salga mojado.
- **Cabezal de Producción:** soporta el peso de todo el equipo de fondo. Diseñado especialmente para facilitar la entrada del cable de poder sin tener fugas de presión del sistema.

2.1.1.2.2 EQUIPO DE SUPERFICIE

- **Generador Eléctrico:** su diseño debe cumplir para que opere de manera confiable y segura ante la variación de cargas del sistema.

Debe tener una capacidad nominal en KVAs y trabajar en un rango de entre 480 y 13.800 volteos teniendo en cuenta picos de voltaje permisibles de +20%.

- **Transformador:** diseñado específicamente para cada uno de los pozos; encargados de distribuir el voltaje requerido para que el generador y el sistema funcione.
- **Switchboard y Controlador del Motor:** controla el encendido del motor de fondo y lo monitorea, obteniendo en la superficie información exacta de los parámetros exactos para tener una operación segura.
- **Variador de Frecuencia:** permite variar la velocidad del motor de fondo y por tanto de la bomba lo cual ayuda maximizar la producción del pozo.
- **Caja de Venteo:** conecta el cable del controlador al cable del pozo, sirve de desfogue de gas que puede introducirse en el cable de potencia y ayuda a la revisión eléctrica del equipo de suelo en diferentes puntos.

2.1.1.2.3 CABLES DE POTENCIA

La función principal del cable de potencia es transmitir la electricidad desde la superficie hacia todo el equipo de fondo. El cables es trifásico, fijado a la tුවiera de producción con sujetadores especiales o flejes.

El cable debe ser dimensionado correctamente para que transmita de manera eficiente la potencia especialmente hacia el motor de fondo teniendo en cuenta el voltaje, corriente, frecuencia temperatura y longitud del cable, lo cuales determinan el calibre del cable que es importante para el diseño del pozo.

Los tres cables deben estar debidamente protegidos para condiciones de deterioro físicas, químicas y eléctricas a los que están expuestos durante la operación.

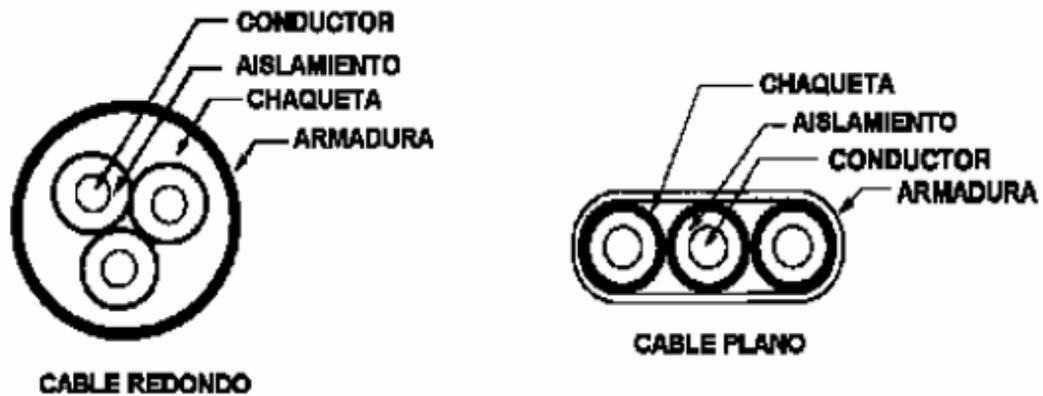


Figura 7: Disposición Cables de Potencia

Todos los componentes del sistema detallados forman un sistema de bombeo artificial que llega a una eficiencia de entre el 35 al 60%, esto se debe a su volumen de producción de BFPD y a que se emplea un motor eléctrico el cual consume alta cantidad de energía.

La aplicación de este sistema se da en pozos de hasta 15.000 pies de profundidad, con fluidos pesados y extra pesados, llegando a un máximo de producción de 45.000 BFLP, responde bien ante fluidos corrosivos, y su versatilidad hace que sea altamente aplicable en pozos en alta mar.

Las limitaciones del sistema parten de la longitud del cable de alimentación que es una parte vital del sistema, de la misma manera se vuelve ineficiente en pozos de bajo nivel de producción ya que su inversión inicial como el consumo de potencia es alto en comparación con otros sistemas.

El equipo es susceptible a fallas cuando se produce fluido con arena o gas por lo cual su aplicación se limita a tener menos del 10% de estos componentes en el fluido para no tener daños dentro de la bomba, por esta razón se necesita un monitoreo por parte de personal especializado constantemente ayudado por los sensores ubicados en puntos específicos del sistema en especial en las variaciones de amperaje el cual se controla mediante cartas amperimétricas, que nos indica el funcionamiento del sistema, y cualquier variación del amperaje registrada en esta carta puede dar la pauta al personal de control de posibles fallos en el funcionamiento del

sistema.

2.1.1.3 BOMBEO MECANICO

El principio de levantamiento artificial es bombear a la superficie el fluido, generalmente agua + petróleo, y llevarlo al tanque de almacenamiento. El bombeo mecánico se da por una unidad de bombeo de fondo, la cual se constituye principalmente por una bomba de profundidad la cual es conecta a una sarta de varillas, las cuales accionan la bomba transmitiendo el movimiento lineal desde la superficie, a lo cual se lo denomina equipo de bombeo mecánico superficial.

Los costos aproximados de implementación de los equipos de bombeo mecánico son:

- Convencional → 360.000 USD.
- Sistema de Carrera Larga (Rotaflex) → 450.000 USD.
- Equipo de Bombeo Mecánico Actual → 360.000 USD.

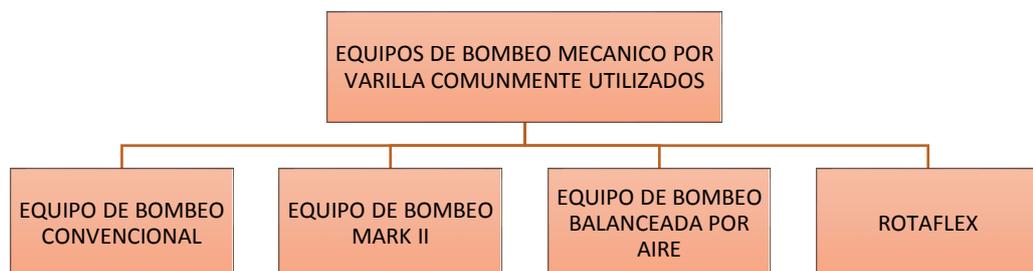


Figura 8: Clasificación de unidades de bombeo comúnmente utilizados.

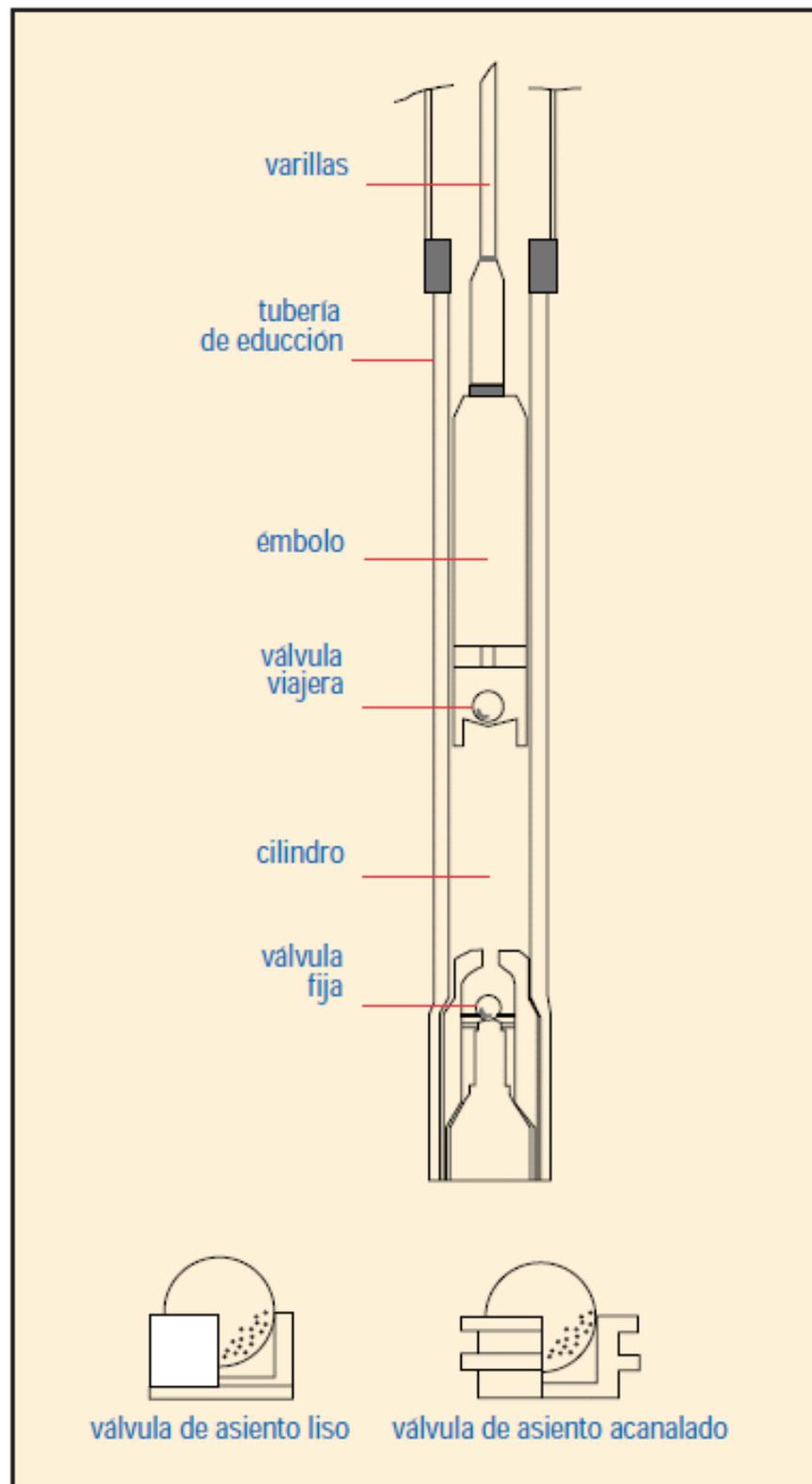


Figura 9: Bomba de Profundidad
(García Danner, y otros, s.f.)

2.1.1.3.1 PARTES PRINCIPALES DE LA ESTRUCTURA DE LA UNIDAD DE BOMBEO MECANICO

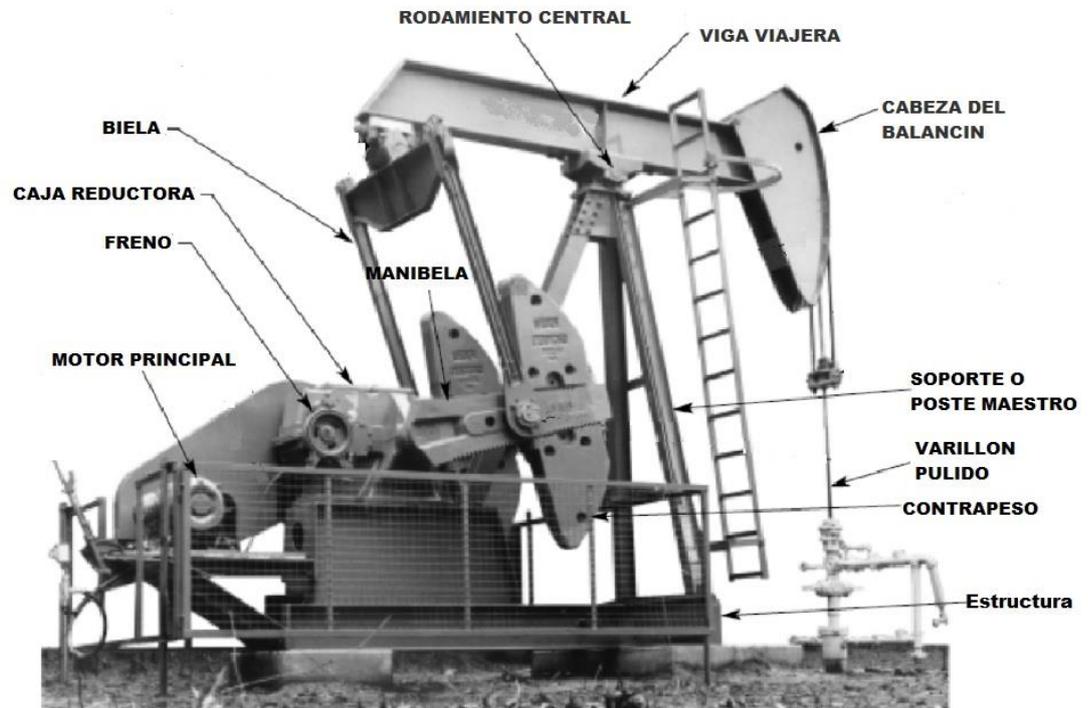


Figura 10: Partes Principales de una Unidad de Bombeo Mecánico Convencional

(Norma API 11E, 2008)

ESTRUCTURA: es la parte fundamental de la unidad de bombeo mecánico, ya que en esta es donde se anclan y soportan todos los componentes como motor caja reductora y soporte o poste maestro. Se lo construyen con perfiles de acero y están anclados a una superficie de concreto mediante pernos de sujeción.

SOPORTE O POSTE MAESTRO: es una de las partes más crítica de la estructura ya que debe soportar aproximadamente el doble de carga máxima de las varillas, por ende debe tener una rigidez y resistencia adecuada para cumplir esta función.

VIGA VIAJERA: mejor conocido como balancín, es una viga de perfil de

acero, la cual se coloca sobre un cojinete en su parte trasera (clase I), o su parte frontal (clase III), según la configuración de la unidad. El balancín se lo diseña según el literal 6.4 de la norma API 11E.

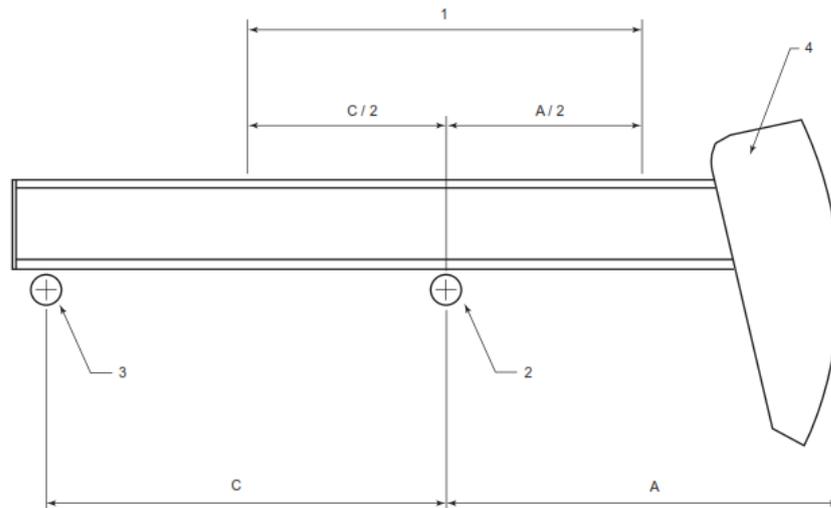


Figura 11: Partes de la Viga Viajera (Norma API 11E, 2008)

Donde:

- 1 Zona crítica del patín a tensión.
- 2 Cojinete silla.
- 3 Cojinete balanceador.
- 4 Cabeza del balancín.

A: Distancia desde el centro del cojinete silla al centro de la varilla pulida expresada en pulgadas.

C: Distancia desde el centro del cojinete silla al centro del cojinete balanceador expresada en pulgadas.

BIELA: elemento que transmite el movimiento desde la manivela al balancín.

MANIVELA: elemento que esta acoplado a la caja reductora de velocidad; es el encargado de transmitir el movimiento rotatorio a las bielas las cuales a su vez la transforman a movimiento lineal, esta acoplado a un contrapeso el cual ayuda a la generación de torque.

CAJA REDUCTORA: su función es reducir la velocidad del motor y

transmitirla hacia la biela; está conformada por un conjunto de engranes reductores y conectado al motor por medio de bandas reductoras. La caja reductora se la diseña bajo el literal 7 de la norma API 11E.

CABEZA DEL BALANCIN: elemento que va en el extremo del balancín, el cual sirve como guía a los cables de acero que can acoplados a la varilla pulida.

COJINETE: elemento donde se asienta el balancín tanto en la biela como en el soporte maestro, sirve como articulación de la estructura.

2.1.1.3.2 DESCRIPCION DEL PROCESO DE BOMBEO MECANICO

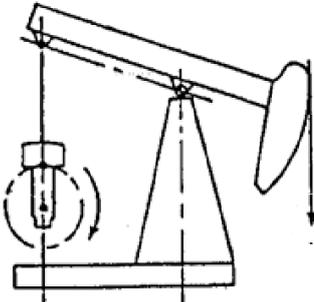
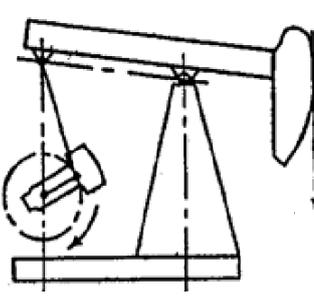
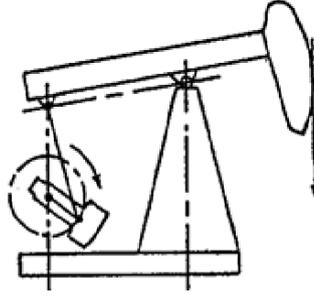
Las unidades de bombeo mecánico son accionadas por motores eléctricos, motores de combustión interna de uno o varios cilindros, dependiendo del torque máximo requerido por el usuario al momento de implementar la estructura en el pozo.

El objetivo principal de las estructuras de las unidades de bombeo mecánico es transformar el movimiento rotativo del motor, a un movimiento lineal el cual se transmite a las varillas que se conectan con la bomba de fondo. Esta transformación es lograda por el mecanismo de cuatro barras, más conocido como mecanismo de biela manivela corredera, implementado en la estructura de la unidad de bombeo, el cual tiene diferentes configuraciones buscando la eficiencia de la transmisión de velocidad, potencia y torque, definiéndose en la norma API 11E como sistema de palanca Clase I y Clase III.

El proceso de bombeo mecánico cumple con un ciclo el cual se divide en 2 etapas principales, la carrera ascendente (upstroke), y la carrera descendente (downstroke), y aunque es difícil generalizar el funcionamiento de las diferentes configuraciones estructurales del equipo de bombeo, podemos describir los parámetros que se cumplen al completar un ciclo, los cuales están descritos en detalle en la tabla 2-1.

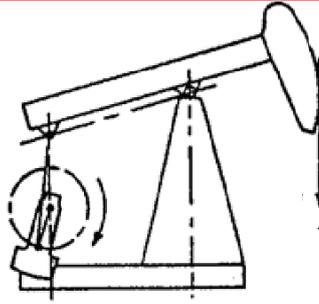
Tabla 2-1

Descripción del ciclo de bombeo.

Nº	Gráfico	Descripción
1		<p>El contrapeso se encuentra en el punto muerto superior. En este punto las varillas se encuentran en su punto más bajo en donde la válvula viajera (t.v), se cierra y se abre la válvula de pie (s.v) y se comienza la carrera ascendente del fluido.</p>
2		<p>La válvula de pie permite que se succione el fluido y se tiene un pico de carga hasta que el mismo entra en el cuerpo de la bomba. El contrapeso comienza a bajar y junto con el motor ayuda al levantamiento de las varillas junto con el fluido. En este punto es donde se llega a la máxima carga que soportan las varillas y la estructura ya que el contrapeso y el motor tienen que elevar el peso de las varillas y del fluido dentro del cilindro. Con</p>
3		<p>Se tiene una pequeña disminución y estabilización de carga debido a que el fluido está recorriendo el cuerpo de la bomba.</p>

CONTINUA →

4

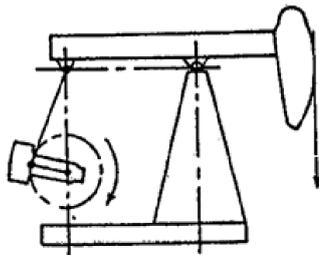


Las varillas llegan a su punto más alto y el contrapeso al punto muerto inferior, con lo cual culmina la carrera ascendente y se da comienzo a la carrera descendente. Se obtiene una disminución de carga ya que se desacelera la viga del balancín y se quita parcialmente la carga de las varillas.

5

Comienza la carrera descendente en donde el movimiento descendente de las varillas y bomba ayudan a levantar el contrapeso junto con el motor. Se genera un aumento de presión en la cámara ya que se tiene las dos válvulas cerradas, esto hace que la válvula de viaje se abra y el fluido dentro del cuerpo de la bomba pase por la válvula de viaje.

6



El peso del fluido se transfiere hacia el cuerpo de la bomba (tubing), mediante el paso del fluido por la válvula viajera, el cual en la próxima carrera ascendente del pistón, será elevado. En este punto se llega a la carga mínima, la cual comienza a crecer conforme disminuye la velocidad de las varillas hasta llegar al punto más bajo de estas y comienza la carrera ascendente completando de esta manera un ciclo.

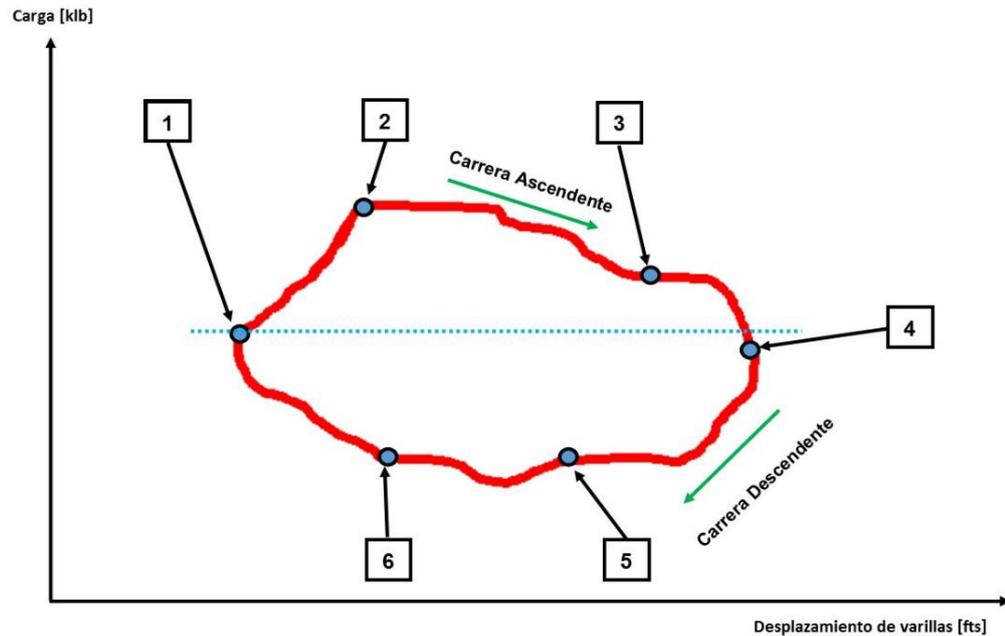


Figura 12: Carta Dinamométrica

2.1.1.3.3 EQUIPO DE BOMBEO CONVENCIONAL

Su nombre técnico indicado en la Norma API 11E es Unidad de Bombeo con Montaje Trasero Geometría Clase I, Sistema de Palancas con Contrapeso de la Manivela.

Esta unidad es la más antigua utilizada en la industria, es muy eficiente y gracias a su diseño simple es la más económica y confiable del mercado y con bajo costo de mantenimiento. Tiene su principal aplicación en la producción de crudos pesados y extra pesados, aunque no es recomendable en pozos desviados ni en los cuales se tenga producción de sólidos o relación gas-líquido muy alta, ya que esto afecta la eficiencia de la bomba.

La ubicación y configuración de funcionamiento del sistema biela-manivela del mecanismo hace que se tenga una aceleración máxima en la carrera ascendente con lo que se tiene un pico de carga más alto en comparación con otras unidades. Cumple con la carrera ascendente y

descendente en 180° cada una cómo podemos ver en la Figura 13.

(Norma API 11E, 2008)

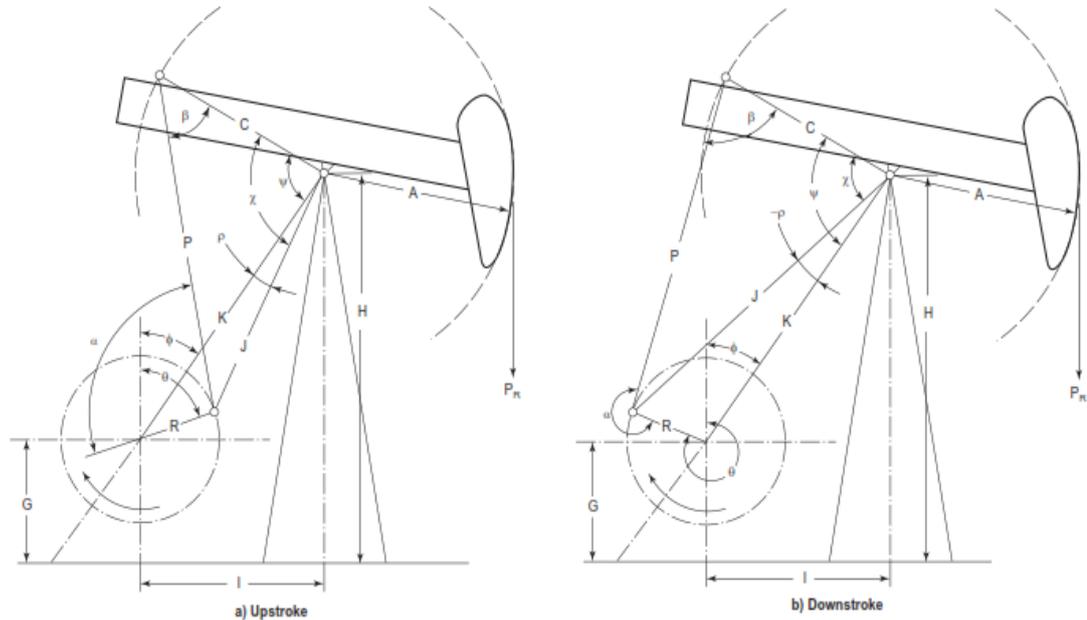


Figura 13: Carreras de la Unidad de Bombeo Mecánico Convencional

2.1.1.3.4 EQUIPO DE BOMBEO MARK II

Su nombre técnico indicado en la Norma API 11E es Unidad de Bombeo con Montaje Frontal Geometría Clase III, Sistema de Palancas con Contrapeso de la Manivela.

Esta unidad de bombeo tiene una eficiencia un poco menor a la unidad convencional, pero al igual que esta, su diseño simple hace que sea confiable, bajo costo de mantenimiento, aunque el costo es moderadamente más elevado.

La ubicación de la caja reductora en la parte frontal, el punto de apoyo en uno de sus extremos, y una manivela desfasada hacen que esta unidad reduzca el torque y la carga con respecto a la unidad convencional. La

ubicación de la caja reductora crea una carrera ascendente de 195° de rotación, con lo que se logra que el sistema ascendente de empuje comience la carrera ascendente con baja aceleración, y una carrera descendente de 165° de rotación con lo cual la carrera descendente tiene una aceleración ligeramente mayor.

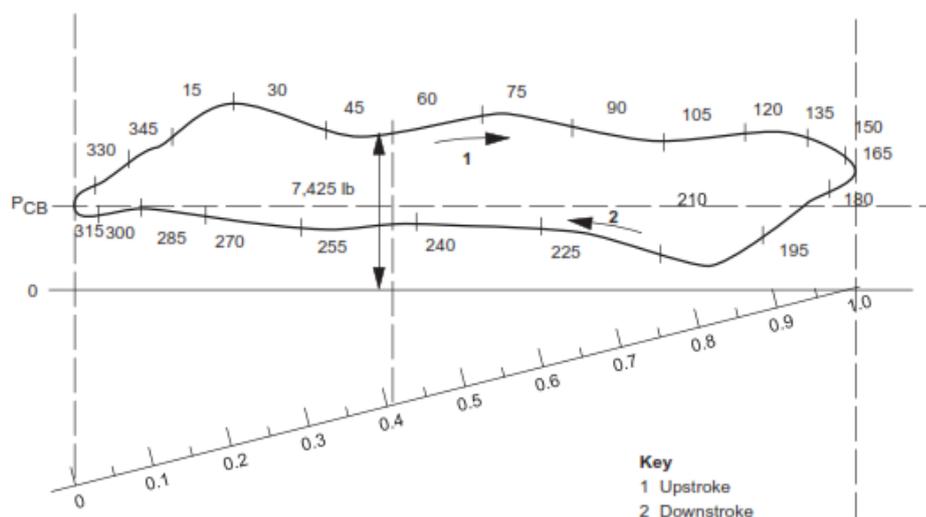


Figura 14: Ejemplo de Carta Dinamométrica usando los datos de Posición de la Varilla Pulida (Norma API 11E, 2008)

En la Figura 14 podemos ver un ejemplo de una carta dinamométrica midiendo la carga durante la carrera de ascenso a un ángulo de rotación de la manivela de 60° , para una unidad de bombeo 160-D de 86 plg., con lo cual al utilizar los datos de la posición de la varilla pulida obtenemos un factor de torque de TF de 35.45 plg., con lo cual obtenemos una carga Pr en este punto de 7.425 lb.

El desfase de la manivela crea un contrabalanceo más eficiente obteniendo un arrastre y empuje de carga de 7.5° en la carrera ascendente y descendente respectivamente.

Con estas características se obtiene una reducción de torque en la caja reductora, con lo cual se reduce el tamaño del motor y consumo de electricidad con lo que se logra reducir costos entre un 5 a 10%, (Marin, 2012), en comparación con la unidad convencional.

La unidad Mark II solo puede trabajar girando su manivela en una sola dirección contrario a las agujas del reloj ya que el sistema de lubricación en la caja reductora es exclusivamente para esta rotación, ya que si se lo hace girar en el otro sentido dañaría considerablemente la caja reductora.

Su aplicación principal es para fluidos medios y ligeros, ya que con otros tipos de fluidos puede dañar las varillas y la bomba.

2.1.1.3.5 EQUIPO DE BOMBEO BALANCEADA POR AIRE

Su nombre técnico indicado en la Norma API 11E es Unidad de Bombeo con Montaje Frontal Geometría Clase III, Sistema de Palancas con Balanceo por Aire.

Esta unidad tiene menor eficiencia y por su diseño complejo, tiene un costo relativamente alto y un mantenimiento más riguroso, pero a su vez son un 35% más pequeñas y un 40%, (Madrid, 2009), más livianas que las que usan manivelas, por esta razón se las utiliza como unidades portátiles o unidades de prueba de pozo ya que los costos de traslado y montaje son considerablemente pequeños.

El balanceo de esta unidad se la hace por medio de aire suministrado por un compresor hacia un cilindro. El compresor se calibra para parar y arrancar automáticamente, dependiendo el peso de las varillas.

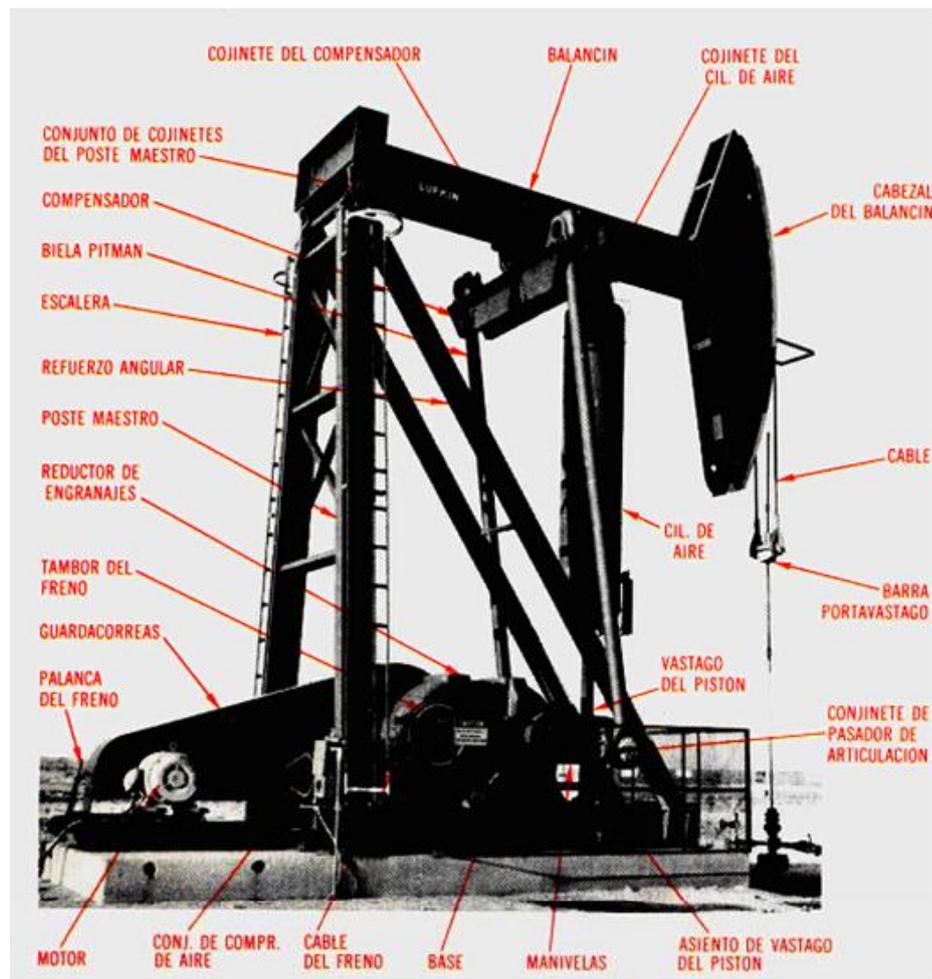


Figura 15: Unidad de Bombeo Balanceada por Aire

(Chanaluisa, 2008)

La diferencia principal de la unidad balanceada por aire con las unidades con contrapesos, es el compresor y los cilindros, el receptor de aire, y el neumático y sus diferentes componentes que hacen que este sistema funcione (regulador de aire, válvula de control de flujo, válvula interruptora del compresor, válvulas de purga), los cuales reemplazan a las pesadas manivelas y el contrapeso. La capacidad de reserva del cilindro neumático es aumentada mediante el cilindro receptor de aire los cuales forman una sola pieza llamada cilindro amortiguador.

El regulador de aire es el que controla al compresor de aire, de esta manera cuando el sistema no tiene suficiente aire el regulador activa el

compresor reponiendo de aire al sistema. El compresor por lo general obtiene su energía del mismo motor que activa la caja reductora, cuando se trata de un motor a combustión, en el caso de ser motor eléctrico el compresor necesitara una fuente de energía propia para su funcionamiento.

Una falla común en este tipo de unidades es la condensación del aire dentro del cilindro, lo cual puede hacer que este pierda presión y se desbalancee la unidad generando daños en la caja reductora.

Se debe tener en cuenta también la lubricación del sistema cilindro pistón ya que cada vez que la unidad este parada por un tiempo de 8 horas se debe llenar el reservorio del sistema de lubricación automático el cual se encuentra en la cabeza del pistón, y periódicamente debe drenarse el aceite y condensado acumulado en el cilindro receptor.

2.1.1.3.6 ROTAFLEX

La unidad de bombeo Rotaflex, es también conocida como unidad de extracción por bombeo de carrera larga. La innovación en el diseño y la utilización de competentes de alta tecnología hace que sea una unidad de alta eficiencia y eficacia en costos, ya que cumple casi a la perfección las situaciones ideales para el bombeo mecánico.

La aplicación principal se da en pozos donde las unidades convencionales no pudieron producir eficientemente, como son en pozos profundos, desviados y horizontales problemáticos, de alto caudal y carga dinámica, y en pozos donde antes solo se operaba con bombas electros sumergibles o hidráulicas.

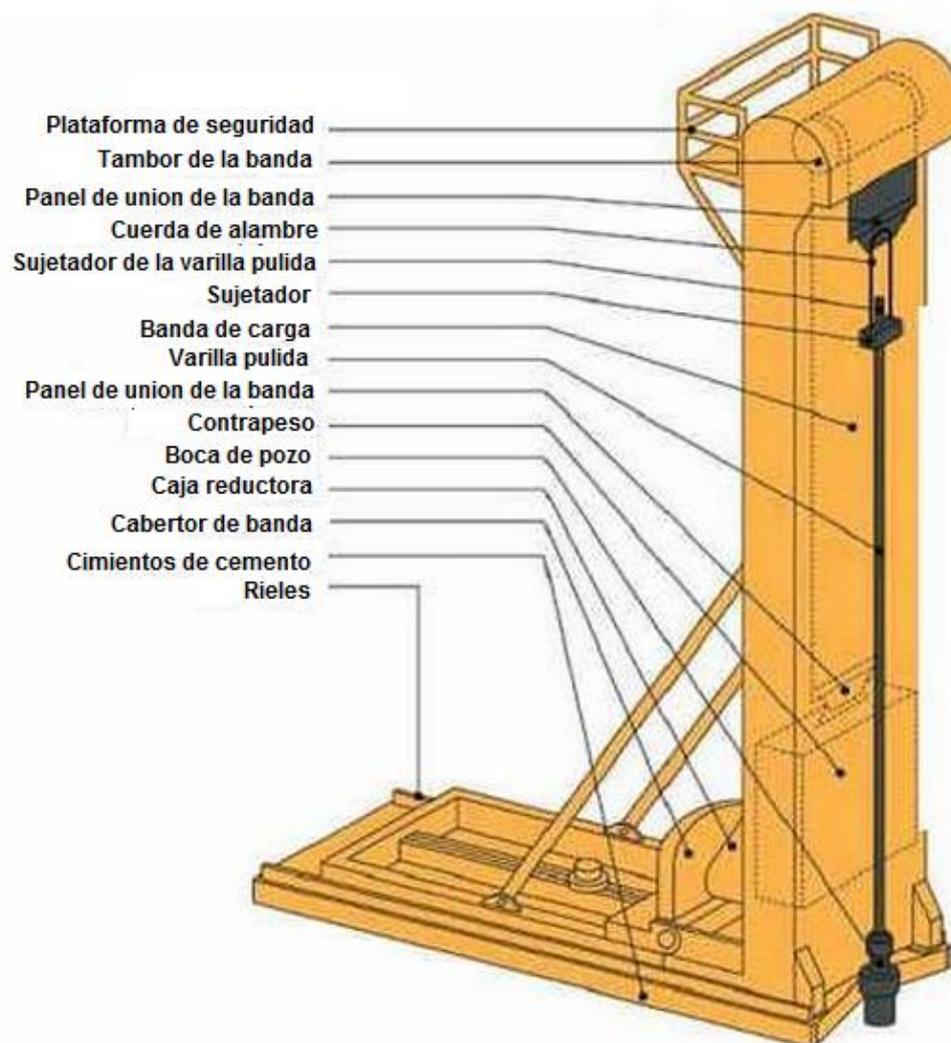
La unidad Rotaflex tiene una carrera larga que alcanza hasta 366 pulgadas (9.3m.), lo que da la posibilidad de que trabaje a muy bajos ciclos por minuto (SPM). Estas dos características hacen que la bomba tenga un llenado completo y menor carga dinámica, por lo que se reduce la carga que se

transmite a la estructura y a las varillas, lo que alarga la vida útil de toda la unidad.

El funcionamiento se da conectando la caja reductora a una rueda dentada motora en la que su corto brazo de palanca implica que se tenga una caja reductora de bajo torque. La rueda motora trasmite el movimiento a una cadena que conecta en la parte superior a otra ruda dentada superior; la velocidad es constante tanto en la carrera de ascendente como descendente. El contrapeso consiste en un número de placas de aproximadamente 9.400 lb que pueden agregarse o quitarse para balancear el torque. El contrapeso se encuentra conectado a la cadena por medio de un mecanismo mecánico inversor con el cual se mueve durante las carreras.

El contrapeso se encuentra conectado en su otro extremo a la banda de carga, la cual conecta la varilla pulida al contrapeso y por ende al sistema de potencia. Esta banda es flexible por lo que actúa como amortiguador de choques que se dan en cada inversión, con lo que esto ayuda a reducir la fatiga en las varillas.

De esta forma en la carrera ascendente del pistón el contrapeso baja, mientras que en la carrera descendente del pistón el contrapeso sube



**Figura 16: Partes de la Unidad Rotaflex
(Odin Petrotech Development Co., s.f.)**

Este sistema de bombeo y el diseño de sus componentes hace que la unidad ahorre en costos de energía entre un 15 y 25%; recientes estudios de mejora de eficiencia de la unidad han hecho que se incorpore a la unidad un variador de frecuencias automatizado, el cual se basa en tener diferentes velocidades en diferentes puntos del ciclo de bombeo, con la finalidad de un incremento de velocidad promedio obteniendo un aumento de 4.5 a 5.2 ciclos por minuto con lo que se logra un incremento en el caudal neto de producción diario.

2.2 EQUIPO DE BOMBEO MECÁNICO ACTUAL

El equipo de bombeo mecánico actual tiene un diseño simple pero innovador el cual obtiene su potencia de bombeo a partir de un sistema hidráulico, movido por un pistón simple efecto de manera vertical con lo que se logra la carrera de ascenso y descenso. La carrera del pistón hace que se transmitan las fuerzas hacia su estructura de soporte, la cual está diseñada para soportar cargas cíclicas que se generan con la carrera de subida y bajada con variación de cargas pico, así como también cargas muertas como tanque reservorio de fluido, motor eléctrico, bomba y diferentes componentes que hacen que la unidad funcione.

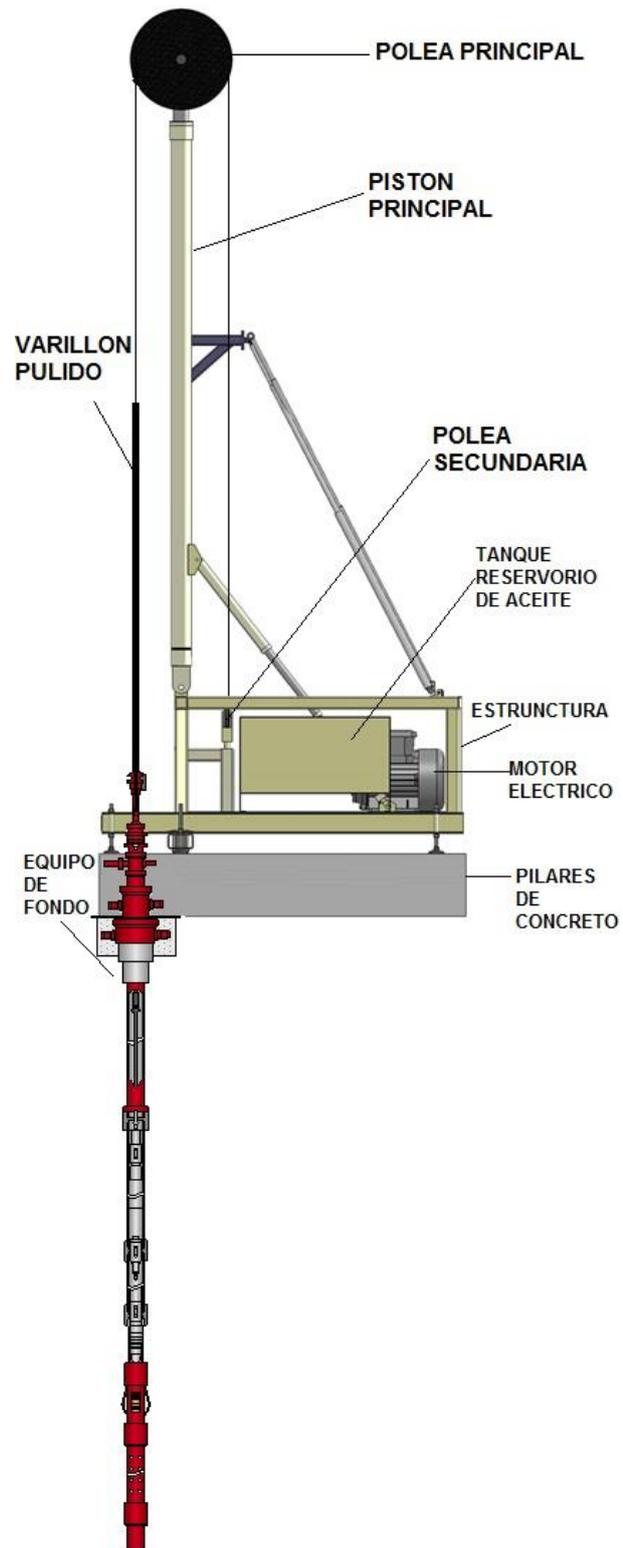


Figura 17: Equipo de Bombeo Mecánico Actual

El equipo cuenta con alta tecnología, la cual monitorea la carga y posición de la varilla pulida, con lo cual puede controlar y ajustar la velocidad instantáneamente para alcanzar una mayor eficiencia de bombeo; no requiere detención del equipo para cambiar los parámetros de bombeo.

El equipo tiene dos modelos en función de su carrera, la LS (long stroke), y XLS (extra long stroke), con carreras de 168 pulgadas y 288 pulgadas respectivamente, lo cual hace que se las considere equipos de larga carrera, y con una amplia aplicabilidad en diferentes condiciones de pozos.

La aplicación del equipo de bombeo mecánico actual se da en pozos con fluido pesado y extra pesado con caudal bajo a medio. Sus largas carreras hacen que se reduzca la fatiga de las varillas, con lo que se aumenta la vida útil de estas y del tubing, con lo que se obtiene menos tiempos muertos en producción y menos utilización de personal. Su punto más alto de eficiencia la obtiene por medio del microprocesador incorporado, el cual censa las condiciones de fondo autoajustando el sistema a niveles de fluido dinámico, con lo que el equipo se vuelve adaptable a casi todos los pozos de producción.

La experiencia en aplicación del equipo actual de bombeo mecánico ha dado buenos resultados; en la parte occidental de Venezuela cerca del lago Maracaibo, en donde se tenía un pozo de bajo potencial y con reservas de fluido pesado, considerado improductivo el cual llegaba a bombear máximo 10 barriles petróleo por día (BOPD), con la unidad de bombeo convencional; al reemplazarlo por el equipo de bombeo mecánico actual por un periodo de 90 días, se obtuvo un incremento a 28 BOPD, llegando al 280% de eficiencia, lo cual provoco que el pozo en un principio declarado improductivo vuelva a crear ganancias y se mejore el aprovechamiento final del mismo.

De la misma manera en el área El Tigre, Venezuela se tenía un pozo que producían fluido con arenas a profundidades de 4.000 pies, lo que incrementaba la viscosidad del fluido y por ende dañaba rápidamente las varillas, con el particular que la producción por día bajo de 600 a 100 BFPD (barriles de fluido por día); después de la implantación del equipo de bombeo

mecánico actual se incrementó la producción a 220 BFPD, obteniendo aproximadamente 160 BOPD.

En base a los resultados y a su diseño el equipo de bombeo mecánico actual es conveniente utilizarlo, en pozos con profundidad mayor a 10.000 pies, cuando el fluido es de alta viscosidad, se tiene bajas cantidades de gas y pocos sólidos, a una temperatura mayor a los 400°F ya que con estas condiciones se obtendrá una producción de barriles por día alta y un consumo de energía baja.

Gracias a las características del equipo se lo ha instalado en varios países como México, Venezuela y Estados Unidos, donde se han obtenido resultados positivos a excepción de un equipo instalado en uno de los pozos en Venezuela, el cual tuvo una falla en la parte estructural, y este tipo de equipos se los va a implementar próximamente en el Oriente ecuatoriano con profundidades y condiciones de fluido más críticas que las obtenidas en Venezuela; se requiere un estudio para la determinación de posibles tipos de fallas y factores los cuales influyeron a que esta falla ocurra; estudio que se lo va a realizar a continuación por medio de un programa CAD, lo que ayudara a formular propuestas de mejoras o rediseño estructural para una carga pico de 40klb, que ayudará a prever una posible falla y paro del equipo en la producción de petróleo.

2.3 ESPECIFICACIONES GENERALES DEL EQUIPO DE BOMBEO MECÁNICO ACTUAL

Especificaciones	Detalle
Capacidad de carga	30.000 lb
Perfil I	Acero A36 (Fy= 36 ksi.)
Tubo Cuadrado	Acero A36 (Fy=36 ksi.)
Capacidad de carga de pistón	40.000 lb

2.4 RESUMEN COMPARATIVO ENTRE TIPOS DE BOMBEO PETROLEO UTILIZADOS EN ECUADOR

Tabla 2-2

Resumen Comparativo entre Tipos de Bombeo Utilizados en Ecuador

Consideraciones de Aplicación	Bombeo Hidráulico	Bombeo Electro sumergible	Bombeo Mecánico				
	Bomba Jet	Convencional	Convencional	Mark II	Balanceada por Aire	Rotaflex	Actual
Profundidad	< 15000 pies	< 15000 pies	< 5000 pies	< 8000 pies	< 8000 pies	>11000 pies	>10000 pies
Volumen de Producción	1000 BFPD	4000 BFPD	225 BFPD	250 BFPD	249 BFPD	1500 BFPD	500 BFPD
Tipo de Fluido	medianos y pesados	pesados y extra pesados	pesados y extra pesados	medianos y pesados	medianos y pesados	medianos y pesados	pesados
Fluido Corrosivos	Bueno	Bueno	bueno	bueno	Bueno	bueno/exc elente	bueno
Fluidos Arenosos	Bueno	Malo	Malo	malo	Malo	malo	bueno
Fluido con Gas	Bueno	Malo	Malo	malo	Malo	malo	bueno
Fuente energía	motor eléctrico o combustión interna	motor eléctrico	motor eléctrico o combustión interna	motor eléctrico o combustión interna	motor eléctrico o combustión interna	motor eléctrico	motor eléctrico
Eficiencia	10 a 30%	35 a 60%	> 60 %	> convencional	60%	45 a 60 %	> convencional
Costo Inicial	\$ 100.000 x mes	\$ 550.000	\$360.000	\$360.000	> Convencional	\$450.000	\$360.000

2.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN POZO PRUEBA CON DIFERENTES TIPOS DE EQUIPOS DE BOMBEO MECÁNICO DE PETROLEO

A continuación se realiza un análisis comparativo entre los tipos de bombeo mecánico instalados en pozos ecuatorianos, comparando las principales variables que caracterizan este tipo de bombeo, con lo cual tenemos que el equipo de bombeo mecánico actual cumple con las mismas funciones y características para la implementación en los pozos a un menor costo de inversión para el cliente.

Tabla 2-3

Análisis Comparativo entre Tipos de Equipos Bombeo Mecánico Petróleo

POZO DE EJEMPLO			
	CONVENCIONAL	ROTAFLEX	ACTUAL
Profundidad de bombeo	9000 pies	9000 pies	9000 pies
Diámetro varillas (plg.)	0,75	0,75	0,75
Motor requerido	Nema D Motor 100 Hp	Nema D Motor 150 Hp	Nema D Motor 150 Hp
Potencia Requerida	89 Hp	120 Hp	125 Hp
Carga máxima (lb)	27397	26712	26767
Carga mínima (lb)	11510	12752	12704
Velocidad de bombeo (SPM)	6,68	1,9	1,92
Producción 100 % eff. (BPD)	151	151	150

CAPITULO 3

3. DISEÑO Y ENFOQUE NUMÉRICO.

El análisis estructural involucra varias herramientas, con las cuales se puede llegar a obtener la respuesta de todas las variables buscadas, llegando a tener una estructura que se acomode a las necesidades básicas que se buscan, las cuales son principalmente: el menor peso de la estructura al menor costo de la misma.

Para el análisis estructural se usará tres herramientas las cuales son las más comunes y confiables; paquetes computacionales como programas CAD, análisis por elementos finitos y programación. Bibliografía sobre diseño de estructuras y normas de construcción como la AISC (American Institute of Steel Construction), con las cuales se asegura que los resultados obtenidos en los aplicativos de los paquetes computacionales (software) coincidan o se ajusten con los principios de la teoría experimental y de la misma forma cumplan con las normas de construcción ya establecidas.

3.1 DISEÑO POR TENSIÓN

Un miembro a tensión, es un elemento cargada axialmente de forma directa, el cual tiende a alargarse. Por lo general y por efecto de cálculo se considera a estos elementos con una distribución de esfuerzos uniformes considerando que es un miembro recto con dos cargas en sus extremos; esta suposición es válida solo si la cara plana no se distorsiona por efecto de las cargas tanto para el rango elástico como plástico del material; sin embargo existen tipos de conexiones o geometrías como agujeros, o muescas en los elementos que hacen que la distribución de esfuerzos no sea uniforme.

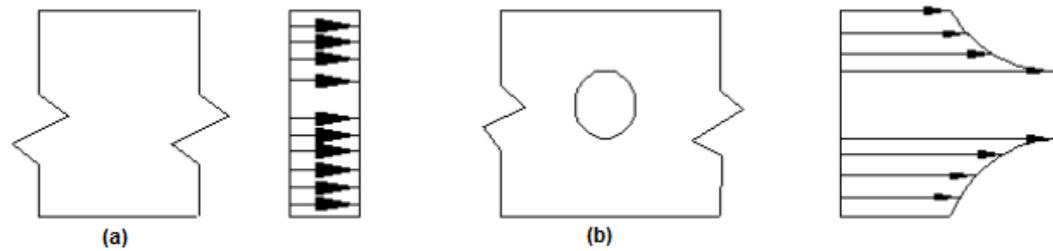


Figura 18: (a) Distribución de Esfuerzos Uniforme (b) distribución de Esfuerzos no Uniforme (Rodríguez, 2006)

La distribución de esfuerzos es importante en el diseño estructural ya que según estos se elige el área a utilizar en la ecuación 3.1. El diseño de miembros a tensión consiste en comparar la carga en tensión de diseño con la carga nominal en tensión del elemento escogido de manera que la carga de tensión requerida en ese miembro sea menor que la resistencia nominal en tensión. La carga nominal trata en el Capítulo D de la norma AISC 2005, en donde se indica la fuerza máxima a aplicar a un elemento en tensión.

La carga máxima a aplicar en toda una sección en su límite elástico está dada por la fórmula D2-1 (AISC, 2005):

$$\frac{P_n}{\Omega_t} = F_y A_g \quad (3.1)$$

Donde:

Ω_t : Factor de corrección para ASD =1,67

P_n : carga nominal en tensión.

F_y : Resistencia a la fluencia del material.

A_g : Área neta (área de la sección donde se aplica la carga a tensión).

La carga máxima a aplicar en una sección para su límite de ruptura está dada por la formula D2-2 (AISC, 2005):

$$\frac{P_n}{\Omega_t} = F_u A_e \quad (3.2)$$

En donde:

$$\Omega_t = 2$$

A_e = Área neta efectiva (determina por la Ec.D3-1 AISC 2005)

F_u : resistencia última del material

Teniendo en consideración que los miembros de la estructura a tratar son soldados completamente en sus conexiones y se transmiten las cargas a toda su sección, se utilizará la ecuación (3.1), ya que $A_g = A_e U$, puesto que $U=1$ por pertenecer al caso 1 de la tabla D3.1 (AISC, 2005)

3.2 DISEÑO A COMPRESIÓN

Los miembros a compresión son aquellos miembros que están cargados axialmente y transmiten una fuerza de compresión a lo largo del eje longitudinal del miembro. Estos elementos se los denomina columnas, y se clasifican en columnas largas, medianas o cortas dependiendo de la relación entre su longitud y las dimensiones de su sección transversal con lo cual podremos escoger la forma de diseño adecuada para cada uno de los elementos de una estructura.

El diseño de elementos a compresión se trata en el capítulo E de la norma AISC 2005. Uno de los principales criterios de diseño es la relación kL/r la cual involucra la longitud efectiva de la columna y el radio de giro que gobierna el perfil (el radio de giro más pequeño en x o y), la cual no debe exceder 200, por recomendación de la norma.

El diseño de estos elementos se basa en comparar la carga crítica P_{cr} , también conocida como carga de Euler con la carga de diseño a compresión requerida con un factor de seguridad $\Omega_c = 1,67$ para ASD. Ya que la geometría y dimensiones de los perfiles ya establecidos evitan que falle el miembro por pandeo local o torsional, el diseño a compresión se enfoca en que el miembro no falle por pandeo lateral o fluencia ocasionada por esfuerzos locales grandes.

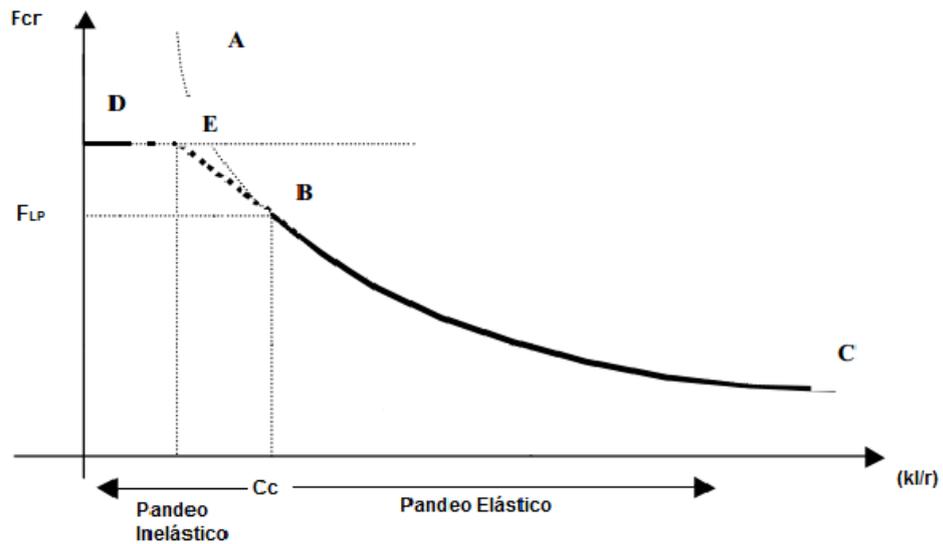


Figura 19: Relación de Esbeltez (AISC, 2005)

El pandeo de las columnas puede ser elástico o inelástico, dependiendo su relación de esbeltez como se muestra en la Figura 19. La esbeltez crítica (C_c), divide a estas dos zonas e indica el valor del esfuerzo límite de proporcionalidad (F_{LP}), o también conocido como el esfuerzo crítico elástico.

En forma general para el diseño de columnas podemos considerar un elemento con carga axial y con una relación kl/r . El esfuerzo producido por la carga axial es:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \bar{E}}{\left(\frac{kl}{r}\right)^2} \quad (3.3)$$

Donde:

F_{cr} : Esfuerzo crítico

\bar{E} : Módulo efectivo

Cuando tenemos una columna esbelta esta tiende a pandearse elásticamente cuando $F_{cr} \leq F_y/2$, por lo que $\bar{E}=E$, con lo cual se calcularía de forma directa el esfuerzo crítico elástico de pandeo (F_e), de la columna con la ecuación:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{kl}{r}\right)^2} \quad (3.4) \text{ (AISC Ec. E3-4)}$$

Pero si $F_e > F_y/2$ la ecuación 3.4 no es aplicable.

Para el cálculo de la estructura a tratar se enfocara en el literal E3 de la norma AISC 2005, el cual aplica para miembros a compresión con secciones compactas y no compactas. Se aplicaran las siguientes ecuaciones:

- Si $\frac{kl}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ entonces $F_{cr} = \left(0.658 \frac{F_y}{F_e}\right) F_y$ (3.5) (AISC Ec.E3-2)
- Si $\frac{kl}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ entonces $F_{cr} = 0.877 F_e$ (3.6) (AISC Ec.E3-3)

3.3 DISEÑO A FLEXIÓN

El diseño de miembros a flexión, se enfoca en el diseño de vigas y trabes. Muy comúnmente las secciones “I” son las más eficientes y usadas para diseñar a flexión ya que las varillas, ángulos y secciones “T” son débiles para este tipo de aplicación. Para este tipo de diseño se debe tomar en cuenta ciertos aspectos importantes:

- Proporcionalidad entre resistencia a la flexión con la estabilidad del patín sujeto a compresión.
- Resistencia al cortante y aplastamiento local.
- Proporcionalidad entre rigidez y deflexión del miembro.
- Proporcionalidad entre tamaño de la viga y tipo de acero, tomando un enfoque económico.

El diseño de vigas se enfoca en la capacidad de ésta para resistir un momento flexionante máximo, teniendo en cuenta los esfuerzos flexionantes permisibles de las fibras de los patines, tanto a tensión como a compresión; en forma general el momento máximo permisible viene dado por el módulo de la sección requerida (s), el cual toma su valor de la inercia (I) y de la distancia del eje neutro a la fibra más externa (c). Por lo tanto tenemos en términos generales la ecuación:

$$F_b = \frac{M_{max} c}{I} \quad (3.7)$$

Donde:

F_b: esfuerzo flexionante permisible.

Mmax: momento máximo flexionante.

C: distancia del eje neutro a la fibra más externa.

I: inercia de la sección.

Y tomando en cuenta AISC 2005, capítulo F tenemos:

$$\frac{Mn}{\Omega t} = Fy * Zx \quad (3.8) \quad (\text{AISC 2005 Ec.F2-1})$$

Donde:

Fy: esfuerzo a la fluencia.

Mn: momento nominal de flexión.

Zx: módulo plástico de la sección en el eje x.

Con este primer análisis se comprueba que la viga soporta la flexión respecto a la fluencia del material en el alma como en los patines; se analiza si la viga soporta el pandeo lateral y torsional. Para el cálculo realizado en la estructura a tratar se utiliza la norma AISC 2005, capítulo F, sección F2, literal 2, la cual especifica las ecuaciones a utilizar:

- Si $Lb \leq Lp$, el estado límite del pandeo lateral torsional no se aplica.
- Si $Lp < Lb \leq Lr$

$$Mn = Cb \left(Mp - (Mp - 0.7FySx) \left(\frac{Lb - Lp}{Lr - Lp} \right) \right) \leq Mp \quad (3.9) \quad (\text{Ec.F2-2})$$

AISC 2005)

- Si $Lb > Lr$

$$Mn = Fcr Sx \leq Mp \quad (3.10) \quad (\text{Ec.F2-3 AISC 2005})$$

$$Fcr = \frac{Cb\pi^2 E}{\left(\frac{Lb}{rts} \right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{Jc}{Sxho} \left(\frac{Lb}{rts} \right)^2} \quad (3.11) \quad (\text{Ec.F2-4 AISC 2005})$$

Donde:

Cb: factor de modificación del pandeo lateral torsional (Ec.F1-1 AISC 2005).

Lb: longitud sin arriostrar de la viga.

Lp: longitud limite sin arrostramientos para pandeo lateral torsional elástico (Ec.F2-5 AISC 2005).

Lr: longitud limite sin arrostramientos para pandeo lateral torsional inelástico (Ec.F2-6 AISC 2005).

E: módulo de elasticidad.

J: constante torsional.

Sx: módulo de la sección elástica en el eje x.

ho: distancia entre los centroides de los patines.

Para este tipo de comprobación hay que tener en cuenta las notas y sugerencias que propone la norma, ya que muchas veces estas simplifican el cálculo.

3.4 DISEÑO A FATIGA

El diseño a fatiga se aplica a miembros y conexiones, sujetos a altos cambios cíclicos de carga, analizado dentro del rango elástico, basado en la frecuencia y magnitud de la carga suficiente para iniciar el fallo y una posible fractura, lo cual se lo denomina estado límite de fatiga.

En el apéndice 3 de la norma AISC 2005, se tiene varias consideraciones y restricciones para este análisis como las mencionadas a continuación:

- Rango de esfuerzos es el cambio de esfuerzos cuando se aplica o se remueve la carga viva.
- Para soldadura con juntas de penetración completa el esfuerzo máximo de diseño calculado, solo se aplica si la soldadura cumple con las especificaciones de la AWS D1.1

- No requiere análisis de fatiga si el rango de esfuerzos calculado es menor que los esfuerzos de la tabla A-3.1 de la AISC 2005
- No requiere análisis de fatiga si el número de ciclos de aplicación de carga es menor a 20000.
- El diseño por fatiga solo se aplicara a estructuras con protección a la corrosión o sujetas a un ambiente bajo en corrosión
- El diseño por fatiga solo se aplica si la estructura trabaja en temperaturas menores a 150 °C.

Con estas restricciones y para el caso de la estructura a tratar se utilizara el apéndice 3, sección 3.3, literal (a) de la norma AISC 2005, tomando los valores de la tabla A-3.1, sección 1. Con lo cual se calcula el rango de esfuerzos de diseño, el cual no deberá exceder el rango de esfuerzos de cargas de servicio.

3.5 ENFOQUE NUMERICO

Dentro del enfoque numérico, el método de análisis por elementos finitos es hoy en día una de las herramientas más utilizadas en el campo ingenieril. Utilizado desde los años 1941, por Hrenikoff, para resolver problemas de elasticidad, el termino de elemento finito como tal se lo empleo en la década de 1960.

Realizar un análisis por elementos finitos, se puede resumir en tres aspectos principales:

- Principios de conservación:
 - Conservación de masa.
 - Conservación de cantidad de movimiento (lineal, angular).
 - Conservación de energía.
- Ecuaciones constitutivas, las cuales son obtenidas por experimentación.
 - $\sigma = E\epsilon$
 - $F = k\delta$
- Modelamiento matemático:

- Condiciones iniciales (tiempo).
- Condiciones de frontera.
 - Esenciales (incógnitas).
 - Naturales (cargas).

Enfocándose específicamente en un análisis estructural, se parte de los sólidos los cuales tienen desplazamientos internos; estos desplazamientos producen deformaciones internas, las mismas que producen esfuerzos, los cuales sirven para el análisis.

$$\vec{\delta}(x, y, z) \rightarrow \epsilon(x, y, z) \rightarrow \sigma(x, y, z)$$

Como se puede observar, el campo de desplazamiento es un vector que se lo puede analizar en cualquier punto del sólido a tratar, cambiando de coordenadas generales a coordenadas particulares del punto a analizar y tenemos:

$$\delta(x, y, z) = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

Para relacionar los desplazamientos con las deformaciones en cada uno de estos puntos llamados nodos del elemento finito basta con derivarlos para cada una de sus coordenadas:

$$\epsilon(x, y, z) = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (3.13)$$

Donde γ es la deformación angular unitaria cortante.

Ahora se tiene que relacionar las deformaciones unitarias con los esfuerzos, para lo cual se utiliza la ley de Hooke para materiales isotrópicos, con lo cual se obtiene:

$$\begin{aligned}
\epsilon_x &= \left\{ \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \right\} \\
\epsilon_y &= \left\{ -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \right\} \\
\epsilon_z &= \left\{ -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \right\} \\
\gamma_{yz} &= \left\{ \frac{\tau_{yz}}{G} \right\} \\
\gamma_{xz} &= \left\{ \frac{\tau_{xz}}{G} \right\} \\
\gamma_{xy} &= \left\{ \frac{\tau_{xy}}{G} \right\}
\end{aligned} \quad (3.14)$$

Dónde: G es el módulo de corte o rigidez.

Sumando las deformaciones unitarias de la Ec.3.14 se tiene:

$$\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = \frac{(1-2\nu)}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (3.14)$$

(Ec. 1.13 – Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería,
Chandrupatla, Segunda Edición.)

Con lo cual se obtiene los esfuerzos en cada coordenada:

$$\sigma(x, y, z) = D * \epsilon \quad (3.15)$$

(Ec. 1.14 – Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería,
Chandrupatla, Segunda Edición.)

Donde D es la matriz del material dada por:

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{Bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu \end{Bmatrix} \quad (3.16)$$

(Ec. 1.15 – Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería,
Chandrupatla, 1999)

De la misma manera enfocándose directamente en la teoría de armaduras planas la matriz D, se convierte en la matriz Ke llamada matriz de rigidez, la cual está basada en los ángulos directores de cada uno de los

elementos que conforman la armadura. Esta matriz de rigidez será utilizada posteriormente en el cálculo de la estructura.

$$K_e = \frac{E \cdot A}{L_e} * \begin{pmatrix} \cos^2 \phi & \sin \phi \cos \phi & -\cos^2 \phi & -\sin \phi \cos \phi \\ \sin \phi \cos \phi & \sin^2 \phi & -\cos \phi \sin \phi & -\sin^2 \phi \\ -\cos^2 \phi & -\cos \phi \sin \phi & \cos^2 \phi & \cos \phi \sin \phi \\ -\cos \phi \sin \phi & -\sin^2 \phi & \cos \phi \sin \phi & \sin^2 \phi \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

(Ec. 4.13 – Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería, Chandrupatla, 1999)

Las relaciones entre desplazamiento-deformación-esfuerzo, es la base de los elementos finitos, de estas se derivan varios métodos para la resolución de esta ecuación. Uno de los más utilizados es el método de Galerín en la elasticidad, con el principio de trabajo virtual, el cual discretiza la solución calculando los desplazamientos en ciertos puntos y luego extrapola estos valores para hallar el resultado en cualquier otro punto de las funciones, de forma que se obtienen resultados de acuerdo al tipo de elemento finito a utilizar.

Para obtener los valores de desplazamientos y posteriormente esfuerzos se utiliza la teoría de armaduras propuesta en el capítulo 4 del libro “Introducción al Estudio del Elemento Finito en Ingeniería”, Segunda Edición, de Tirupathi R. Chandrupatla.

El procedimiento a seguir para el cálculo de los desplazamientos es el siguiente:

- Realizar un diagrama de la armadura ubicando los nodos de conexión de cada elemento, grados de libertad de cada nodo y longitud de cada elemento.
- Enumerar cada nodo, grado de libertad y elemento, empezando de abajo hacia arriba y de izquierda a derecha.
- Poner un punto (0,0) de referencia.
- Realizar una matriz de coordenada de cada uno de los nodos en base al punto de referencia.

- Realizar una matriz de conectividad de los elementos identificando su nodo de inicio y su nodo final.
- Obtener la matriz de rigidez de los elementos.
- Ensamblar la matriz de rigidez general de la armadura.
- Realizar la matriz general reducida eliminando las restricciones del problema de la matriz de rigidez general.
- Realizar la matriz de fuerzas externas actuantes sobre la armadura.
- Sacar la inversa de la matriz de rigidez general reducida.
- Multiplicar la matriz fuerzas externas por la matriz de rigidez general reducida para obtener los desplazamientos.

3.6 SIMULACIÓN.

La utilización de diferentes softwares ayuda a optimizar el tiempo de los cálculos que en este caso son estructurales. Por esta razón se utilizará dos softwares de elementos finitos diferentes, un software de modelación CAD, y un software de programación matemático.

La utilidad del software de programación matemático ayudará a optimizar el cálculo con la teoría de armaduras y a validar la obtención de resultados con el software de elementos finitos. La utilidad del software de elementos finitos ayudará a obtener las reacciones antes mencionadas, RB y RC del sistema. Se utiliza este software solo para obtener estas reacciones ya que en el modo de resolver problemas estructurales utiliza elementos estructurales llamados frames, lo que hace que el cálculo sea mucho más rápido.

La utilización del otro software de elementos finitos ayudará a obtener los esfuerzos en las diferentes partes de la estructura, así como el cálculo de la misma a fatiga. La simulación en este software se la realiza eliminando elementos que solo transmiten fuerzas a la estructura base, como son el cilindro principal, cilindro secundario y tensores, ya que el software utiliza elementos finitos hexaédricos, los cuales al tener volumen aumentan considerablemente el gasto de tiempo computacional, pero a su vez se obtiene una mejor precisión de los resultados obtenidos.

CAPITULO 4

4. CÁLCULOS, SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Para el análisis de la estructura, se realiza un diagrama de cuerpo libre de la estructura con las cargas actuantes sobre la misma (Figura 20).

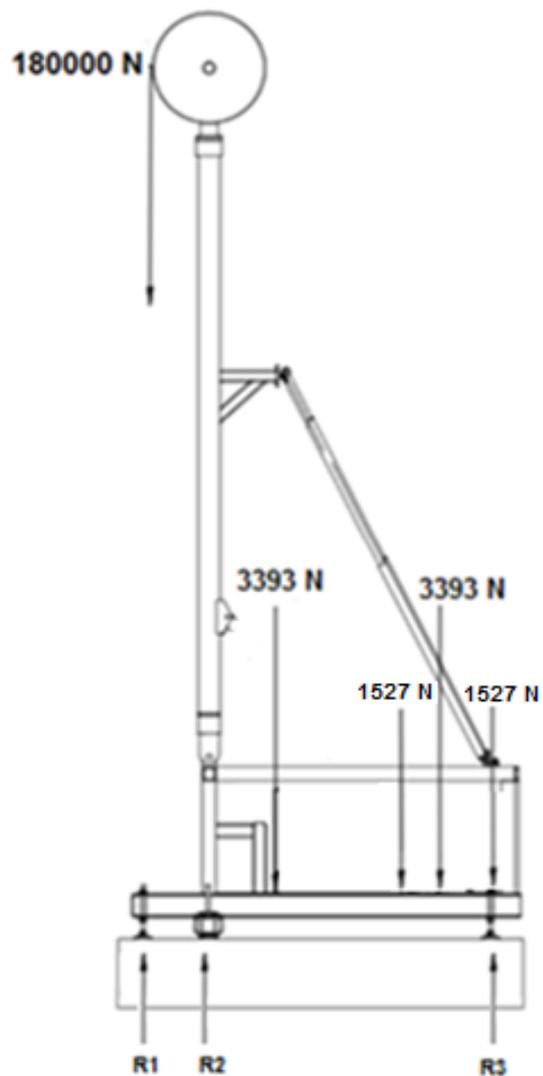


Figura 20: Diagrama de Cuerpo Libre

Las principales cargas de la estructura son el peso de las varillas y fluido levantado en el extremo de la polea (180000N aproximadamente 40000 lb), peso del tanque reservorio de aceite distribuido en las dos vigas C (3393 N), y el peso del motor eléctrico distribuido en sus 4 puntos de anclaje a la estructura (1527 N).

4.1 CÁLCULO MEDIANTE TEORÍA DE ARMADURAS METÁLICAS CON ELEMENTOS FINITOS.

Se considera al pistón principal como una columna con una carga axial en su punto más crítico superior (cuando el pistón está en la carrera de levantamiento en su máxima longitud), y un empotramiento articulado en el extremo inferior. (Figura 21).



Figura 21: Diagrama de Cuerpo Libre del Pistón Principal

Se inicia la resolución de la columna numerando los elementos y poniendo su longitud real; se numera los nodos y se identifica los grados de libertad.

En la columna se tiene 4 elementos, 5 nodos y 10 grados de libertad. (Figura 22).

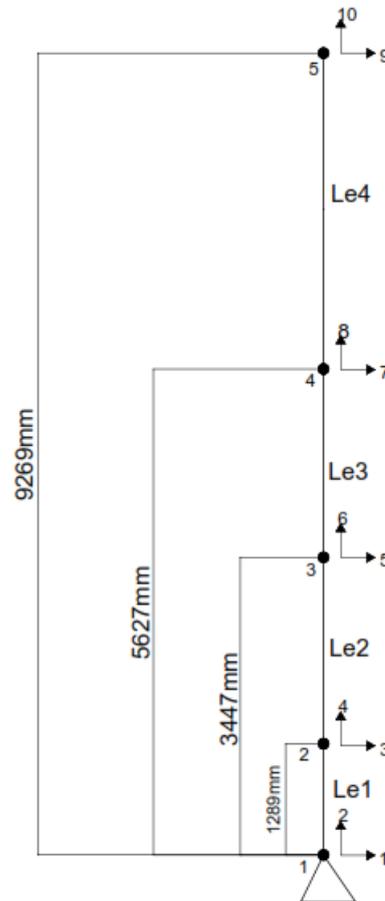


Figura 22: Diagrama de Elementos Finitos

En base a la Figura 22 se obtiene la información necesaria para el planteamiento del problema. Se tiene la matriz de coordenadas de los nodos denominada "Co" y la matriz de conectividad de los elementos denominada "El":

$$Co = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1289 \\ 3 & 0 & 3447 \\ 4 & 0 & 5612 \\ 5 & 0 & 9269 \end{Bmatrix} \quad El = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 3 \\ 3 & 3 & 4 \\ 4 & 4 & 5 \end{Bmatrix}$$

De la teoría de armaduras planas se tiene la matriz de rigidez general denominada "Ke":

$$Ke = \frac{E * A}{Le} * \begin{pmatrix} \cos^2\phi & \sin\phi\cos\phi & -\cos^2\phi & -\sin\phi\cos\phi \\ \sin\phi\cos\phi & \sin^2\phi & -\cos\phi\sin\phi & -\sin^2\phi \\ -\cos^2\phi & -\cos\phi\sin\phi & \cos^2\phi & \cos\phi\sin\phi \\ -\cos\phi\sin\phi & -\sin^2\phi & \cos\phi\sin\phi & \sin^2\phi \end{pmatrix}$$

Dónde: E: módulo de elasticidad del material.

A: área de la sección transversal del elemento.

Le: longitud del elemento.

ϕ : ángulo del elemento medido desde el punto de conectividad más bajo en sentido anti horario.

En base a la matriz de rigidez general se obtiene la matriz de rigidez de cada uno de los elementos del sistema:

$$Ke1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1179200 & 0 & -1179200 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1179200 & 0 & 1179200 \end{pmatrix}$$

$$Ke2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 704360 & 0 & -704360 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -704360 & 0 & 704360 \end{pmatrix}$$

$$Ke3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 702080 & 0 & -702080 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -702080 & 0 & 702080 \end{pmatrix}$$

$$Ke4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 415640 & 0 & -415640 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -415640 & 0 & 415640 \end{pmatrix}$$

Se procede a ensamblar la matriz de rigidez del sistema con la ayuda de con las ecuaciones de ensamble:

$2i - 1$ para el eje x
 $2i$ para eje y

Con lo cual se tiene la posición de fila y columna de cada elemento en la matriz general:

<i>Elemento1</i>	1	2	<i>Elemento2</i>	2	3
	$2i - 1$	1 3		$2i - 1$	3 5
	$2i$	2 4		$2i$	4 6

<i>Elemento3</i>	3	4	<i>Elemento4</i>	4	5
	$2i - 1$	5 7		$2i - 1$	7 9
	$2i$	6 8		$2i$	8 10

Se resume el método de ensamble de la matriz general en la siguiente tabla:

Tabla 4-1

Ensamble de la Matriz General de Rigidez

Elemento	Matriz Elemento Fila y Columna	Matriz General Fila y Columna
1	1-2-3-4	1-2-3-4
2	3-4-5-6	3-4-5-6
3	5-6-7-8	5-6-7-8
4	7-8-9-10	7-8-9-10

Se tiene la matriz general del sistema "Kg" de 10x10:

$$kg = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 117920 & 0 & -117920 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -117920 & 0 & 188360 & 0 & -70440 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 70440 & 0 & 140640 & 0 & 70210 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -70210 & 0 & 111770 & 0 & -41560 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.4156 & 0 & 41560 \end{pmatrix}$$

Se discretiza la matriz con las condiciones iniciales y se tiene que en los nodos 1, 2, 3, 5, 7, 9 no existen desplazamientos por estar empotrados, con lo que se elimina las filas y columnas obteniendo la matriz reducida KG:

$$KG = \begin{pmatrix} 188360 & -70440 & 0 & 0 \\ 70440 & 140640 & 70210 & 0 \\ 0 & -70210 & 111770 & -41560 \\ 0 & 0 & -0.4156 & 41560 \end{pmatrix}$$

Se obtiene la inversa de esta matriz:

$$KG^{-1} = \begin{pmatrix} 8480 & 8480 & 8480 & 8480 \\ 8480 & 22680 & 22680 & 22680 \\ 8480 & 22680 & 36920 & 36920 \\ 8480 & 22680 & 36920 & 60980 \end{pmatrix}$$

Se ingresa la matriz de condiciones externas del sistema (fuerzas externas en Newton):

$$F[N] = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -360000 \end{pmatrix}$$

Se aplica la ecuación 4.1 que se la formula en base a la ecuación constitutiva $F = k\delta$ para obtener los desplazamientos d :

$$d = KG^{-1} * F \quad (4.1)$$

Con lo que tenemos los desplazamientos en los puntos requeridos:

$$d [mm] = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.3053 \\ 0 \\ -0.8164 \\ 0 \\ -1.3292 \\ 0 \\ -2.1953 \end{pmatrix}$$

Con los desplazamientos obtenidos se pueden calcular las fuerzas de reacción en la columna propuesta con lo que se tiene:

$$F_{\text{nodos}}[N] = \begin{pmatrix} 0 \\ 360000 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -360000 \end{pmatrix}$$

Los resultados mostrados en la matriz F_{nodos} da como resultado que solo existe reacción en $R_A = 360000$ N, y las reacciones R_B y R_C son cero, lo cual está correcto, tomando en cuenta que solo se analizó la columna a compresión fuera del sistema. Estos resultados los comprobamos con un software de elementos finitos mostrado a continuación.

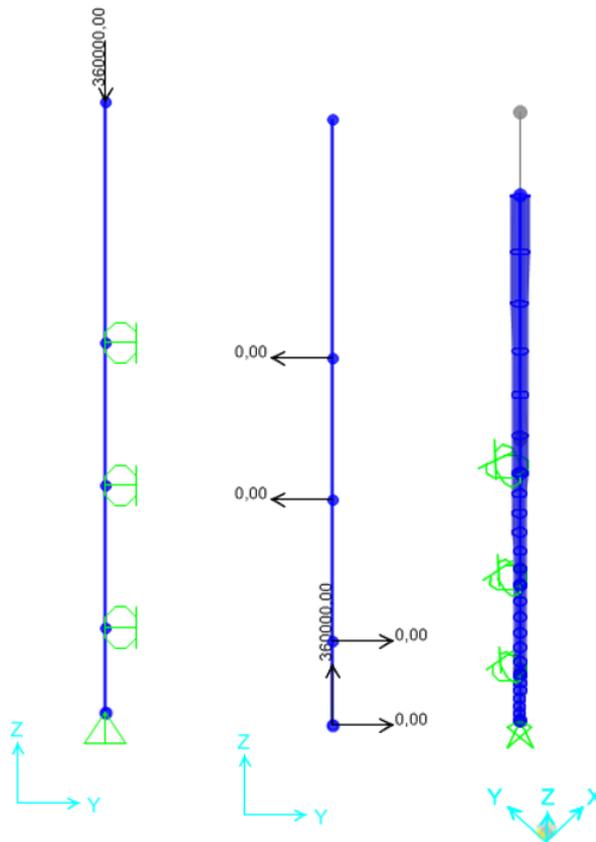


Figura 23: Cálculo mediante software de elementos finitos

Se comprueba los desplazamientos y se compara con los cálculos obtenidos a mano en la siguiente tabla 4-2.

Tabla 4-2

Comparación de Desplazamientos de Teoría de Armaduras y software de elementos finitos

Nodo	Tipo de Calculo		
	Teoría Armaduras (mm)	Software EF(mm)	%error
1	0	0	0,000%
2	-0,3053	-0,3053	0,000%
3	-0,8164	-0,8165	0,012%
4	-1,3292	-1,3294	0,015%
5	-2,1953	-2,1957	0,018%

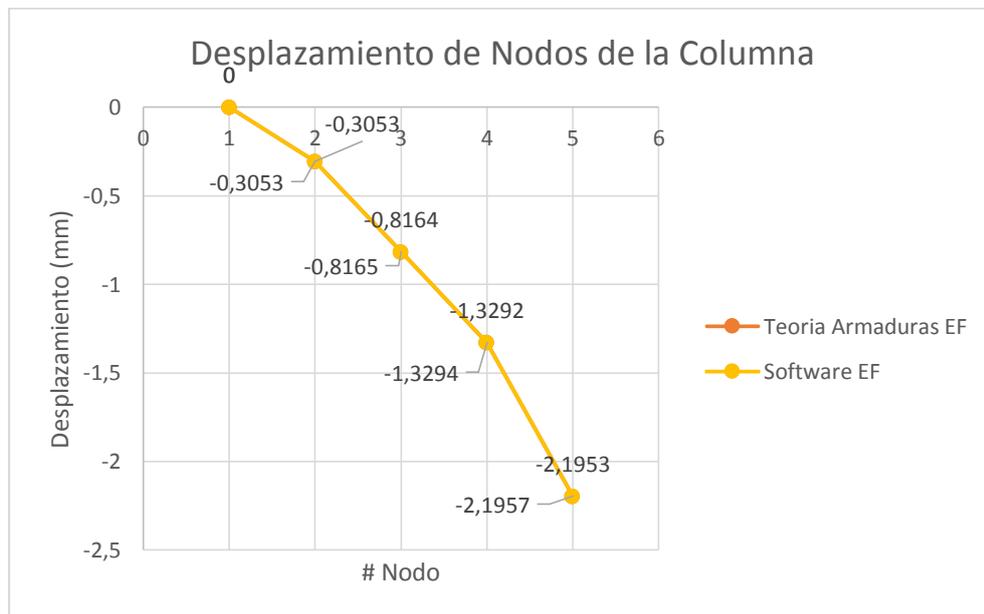


Figura 24: Comparación de resultados de cálculos de la columna

Con los resultados obtenidos se valida la simulación en el software de elementos finitos en el cual obtendremos las reacciones restantes RB y RC.

4.1.1 CÁLCULO DE REACCIONES RB Y RCx

Se modela el sistema estructural a dimensiones reales en la interfaz del software de elementos finitos, aplicando las cargas estáticas actuantes indicadas en la Figura 21, con lo cual se obtiene los siguientes resultados:

RB= 6875,84 N, la fuerza actuante real sobre la estructura es 5880 N, (dato tomado directamente del software). **RCx=1445.36**, la fuerza actuante real sobre la estructura es 1527 N

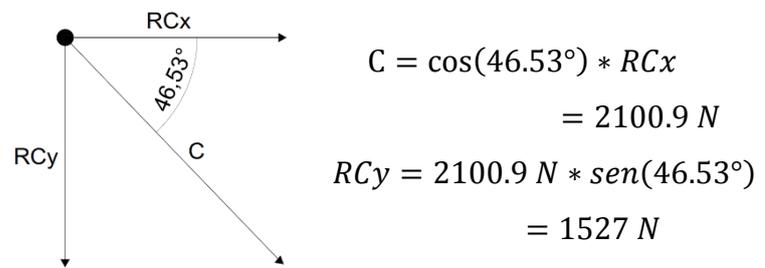


Figura 25: Diagrama de fuerzas en reacción C

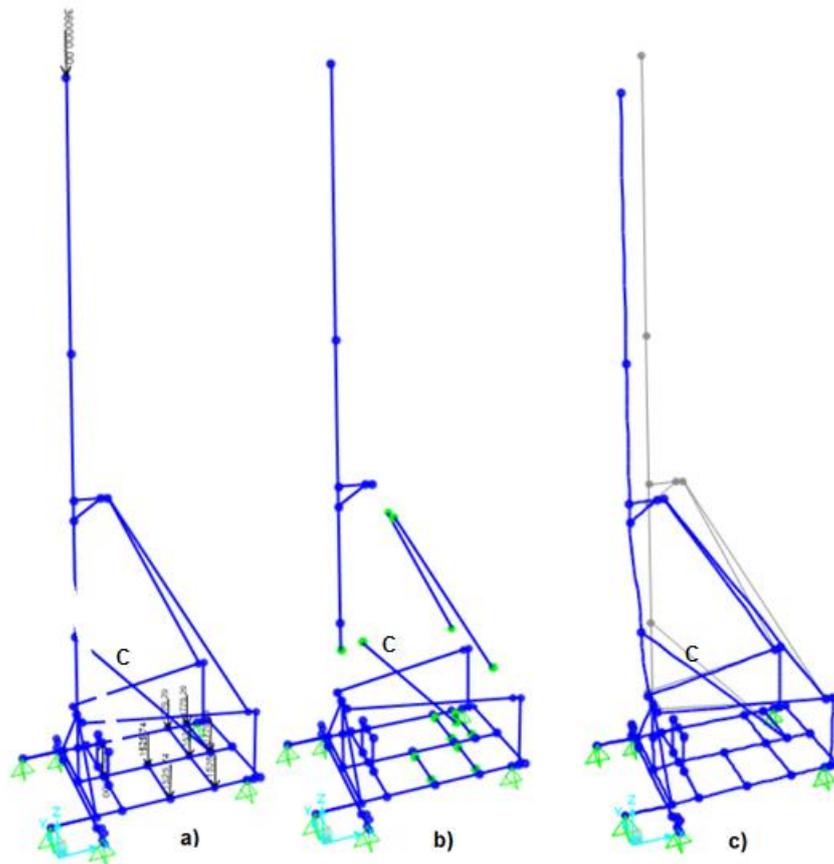


Figura 26: a) estructura modelada con cargas, b) estructura con nodos liberados de pines, c) estructura deformada por acción de las cargas

4.1.2 CÁLCULO DE ESFUERZOS

Con las fuerzas actuantes sobre el marco principal de la estructura, se realiza el cálculo de esfuerzos de la estructura, mediante la simulación en el software de elementos finitos, en el cual se busca primeramente una malla adecuada en la que los resultados obtenidos converjan, con lo cual se prueba diferentes tipos de mallados detallados en la tabla 4-3, y se muestra la convergencia de resultados con las Figuras 32 - 36.

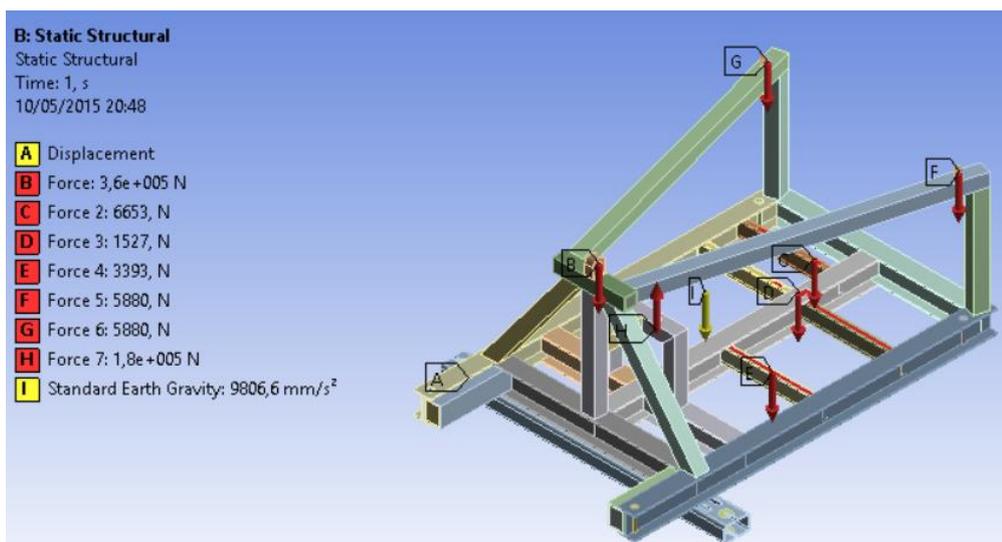


Figura 27: Esquema de fuerzas sobre la estructura base

4.1.2.1 PROCEDIMIENTO DE CONVERGENCIA DE RESULTADOS EN BASE AL MALLADO

Los cálculos de resultados mediante software de elementos finitos no siempre son los adecuados ya que influyen varias variables que se ingresan en el software, dentro de las cuales las principales son: generación de malla e ingreso de las condiciones a las cuales se encuentra trabajando el sistema a analizar. En el caso puntual presentado en este proyecto las condiciones a ingresarse son las fuerzas externas que actúan dentro del sistema y los apoyos en donde se sostiene la estructura.

En la estructura a analizar tenemos los apoyos que mantienen a la estructura sobre el piso, y los cuales sostienen a la estructura por una tuerca

en el patín superior e inferior. Estas condiciones ingresamos en la simulación como una superficie, la cual tiene restricciones de desplazamiento cero en los 3 ejes coordenados (figura 28).

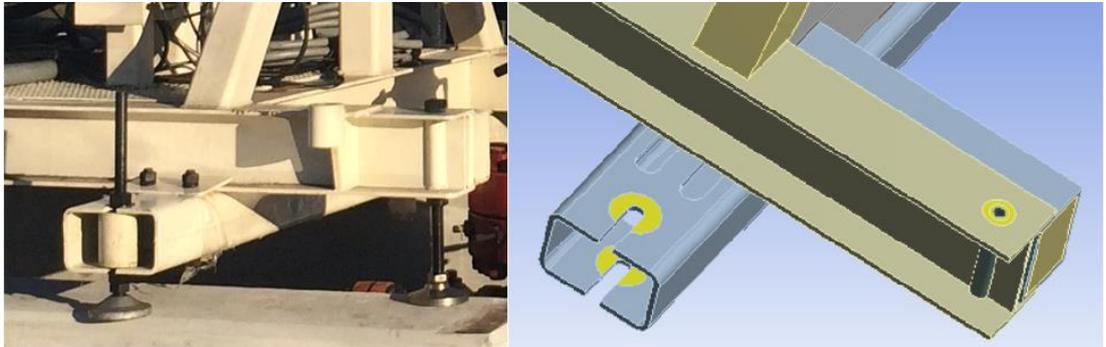


Figura 28: Condiciones de apoyo de la estructura

Posteriormente se ingresan las fuerzas actuantes sobre la estructura (figura 27).

Con estos datos ya ingresados se procede a realizar el mallado de la estructura, el cual por default del software tiene un mallado de elementos triangulares y de diferente tamaño adaptándose automáticamente a la geometría de la estructura; con este primer mallado se obtuvieron resultados los cuales comenzaron a indicar ciertos puntos críticos en donde se obtiene mayor esfuerzo en la estructura.

Se realiza un segundo mallado con elementos más pequeños y cambiando la configuración de tipo de elementos a hexaédricos, con lo que se comprueba un cambio considerable de valores obtenidos.

Se realiza un tercer mallado con elementos de menor tamaño al anterior y se obtiene un cambio de valor en los resultados obtenidos pero se mantienen los puntos críticos en la estructura, con lo cual se escogen estos puntos críticos que en este caso son 4 (figura 29 – 31), para realizar la convergencia de la malla.

Los puntos críticos de análisis utilizados para la convergencia son los siguientes:

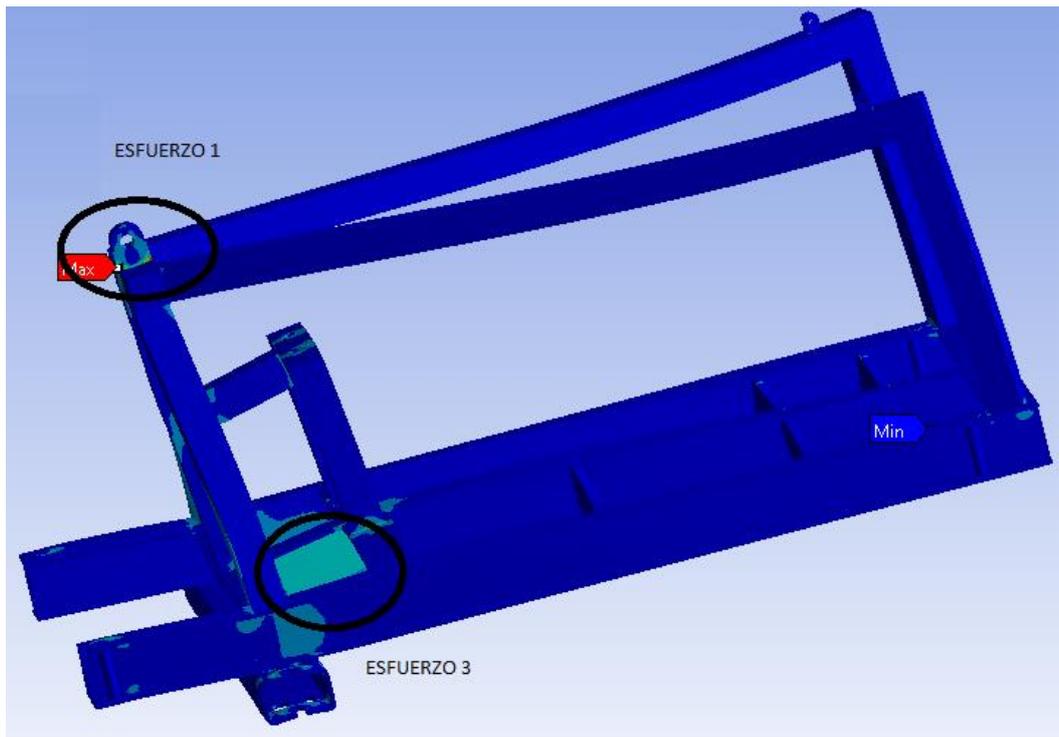


Figura 29: Puntos de Análisis 1 y 3

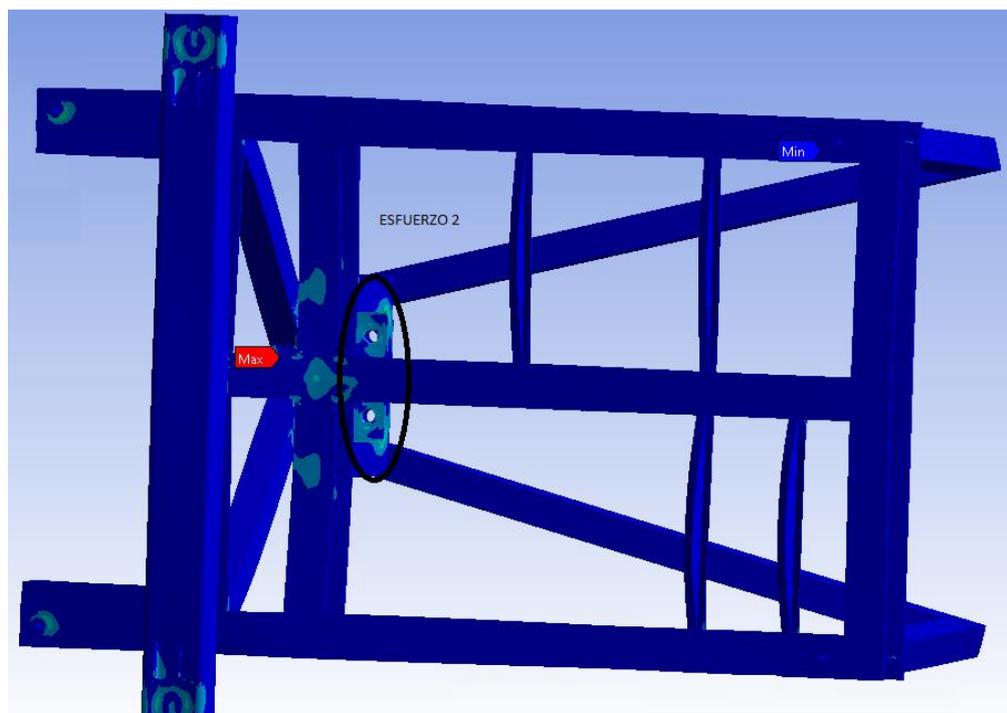


Figura 30: Punto de Análisis 2

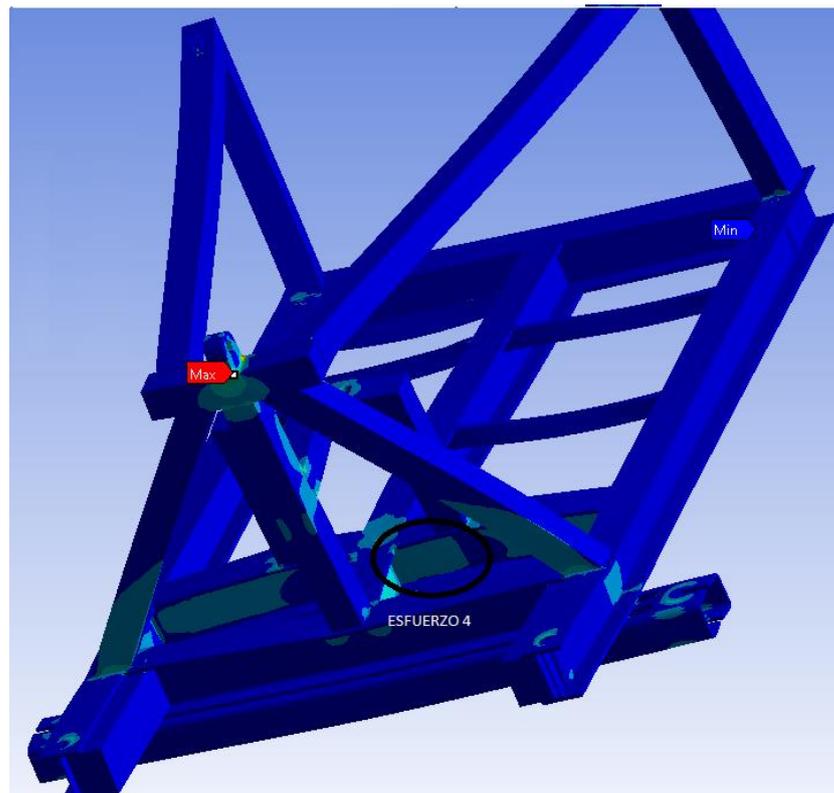


Figura 31: Punto de Análisis 4

Para obtener la convergencia del mallado se realizaron varios ensayos, en los cuales uno de los principales cambios fue utilizar elementos hexaédricos en lugar de elementos triangulares, ya que como se puede ver en la tabla 4-3, el porcentaje de error de resultados es considerablemente grande.

Posteriormente se realizó un cambio de tamaño de elementos comenzando con un tamaño de elemento de 50mm, bajando 10mm., en cada uno de los ensayos, hasta llegar a un tamaño de elemento de 20mm., en el cual el último cambio de tamaño fue solo de 5mm., con lo que se llegó a un mallado de 15mm., en el último ensayo.

El cambio de tamaño de elemento se lo realizó tomando en cuenta el número de nodos obtenidos, la densidad de mallado y la capacidad de la PC utilizada, ya que al realizar un mallado cada vez más pequeño, el número de nodos aumenta y el gasto computacional tanto para el mallado como para la resolución matemática del problema, aumenta considerablemente.

Tabla 4-3

Convergencia de Esfuerzos Según el Mallado

Malla					ESFUERZO (MPa) y % CAMBIO							
#	# nodos	# elementos	detalle malla	tamaño (mm)	1	%	2	%	3	%	4	%
1	55304	24978	triangular	default	90,8	66,89	85,71	32,14	90,21	10,47	49,71	2,85
2	234627	64327	hexaedros	50	274	1,05	126,2	3,59	81,65	0,35	51,17	0,34
3	262336	75832	hexaedros	40	271	2,01	121,8	2,18	81,94	0,1	51,34	0,14
4	390049	107261	hexaedros	30	277	0,4	124,5	3,16	81,86	0,95	51,27	0,34
5	473203	110166	hexaedros	20	276	0,36	120,7	2,85	81,09	0,15	50,62	0,08
6	750394	168269	hexaedros	15	275		124,3		81,22		51,05	

Tabla 4-4

Convergencia de Factor de Seguridad Según el Mallado

Malla					FACTOR DE SEGURIDAD y % CAMBIO							
#	#nodos	# elemento	detalle malla	tamaño elemento	1	%	2	%	3	%	4	%
1	55304	24978	triangular	default	1,25	207,07	1,35	54,38	1,26	8,25	2,29	5,5
2	234627	64327	hexaedros	50	0,4	1,94	0,88	3,79	1,37	0,84	2,17	0,02
3	262336	75832	hexaedros	40	0,41	7,88	0,91	4,26	1,38	0,77	2,17	0,09
4	390049	107261	hexaedros	30	0,38	5,11	0,87	5,03	1,37	0,01	2,17	0,22
5	473203	110166	hexaedros	20	0,4	1,19	0,92	3,95	1,37	0,12	2,16	0,18
6	750394	168269	hexaedros	15	0,41		0,88		1,37		2,16	

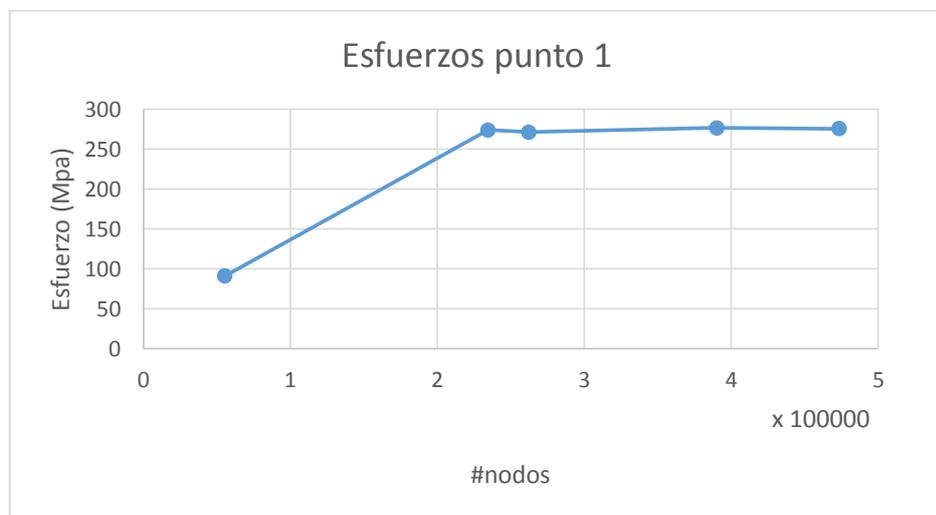


Figura 32: Convergencia de esfuerzos en el punto 1.

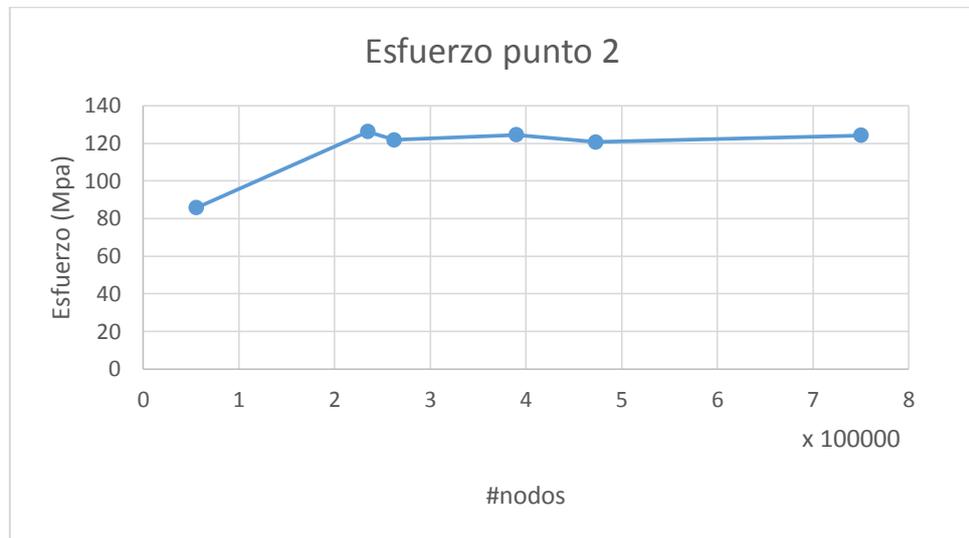


Figura 33: Convergencia de esfuerzos en el punto 2

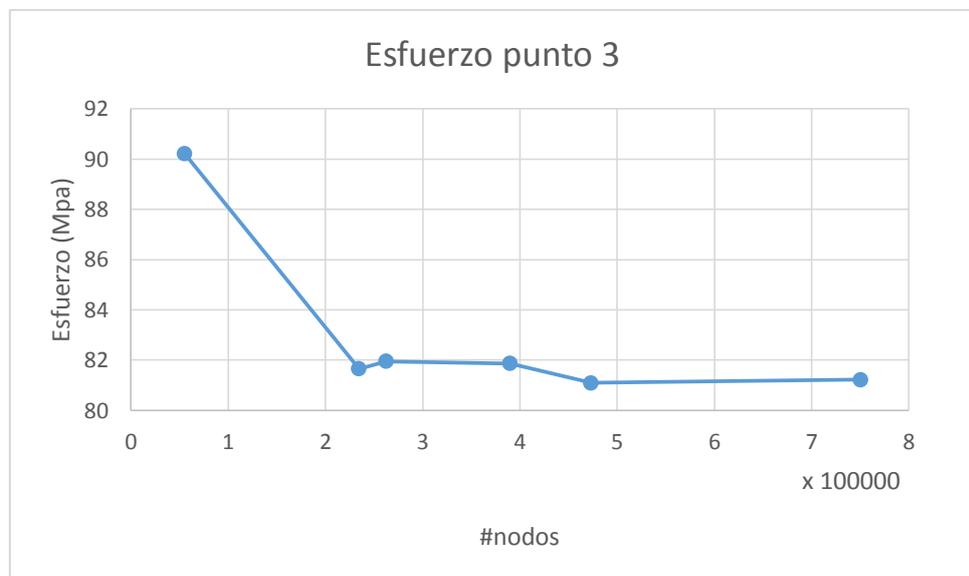


Figura 34: Convergencia de esfuerzos en el punto 3

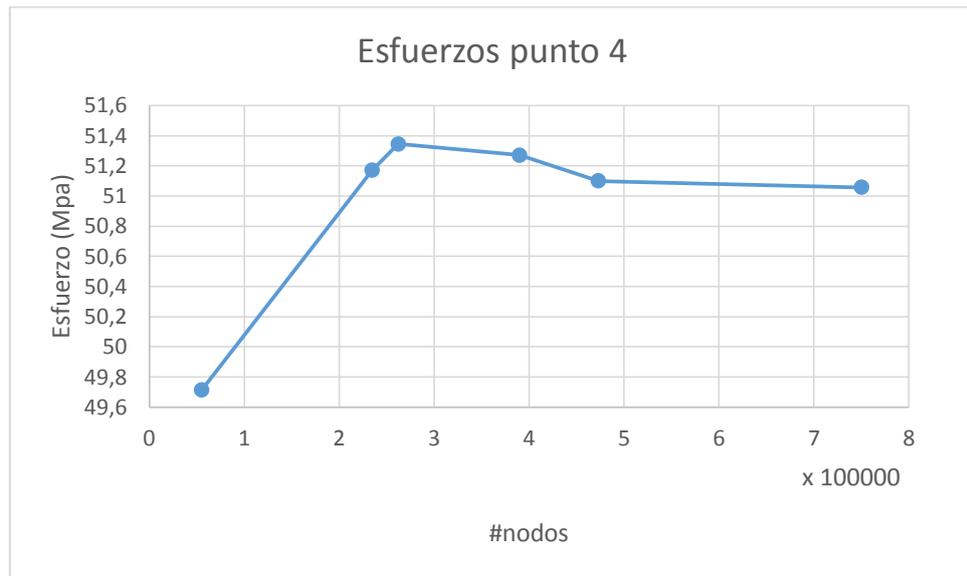


Figura 35: Convergencia de esfuerzos en el punto 4

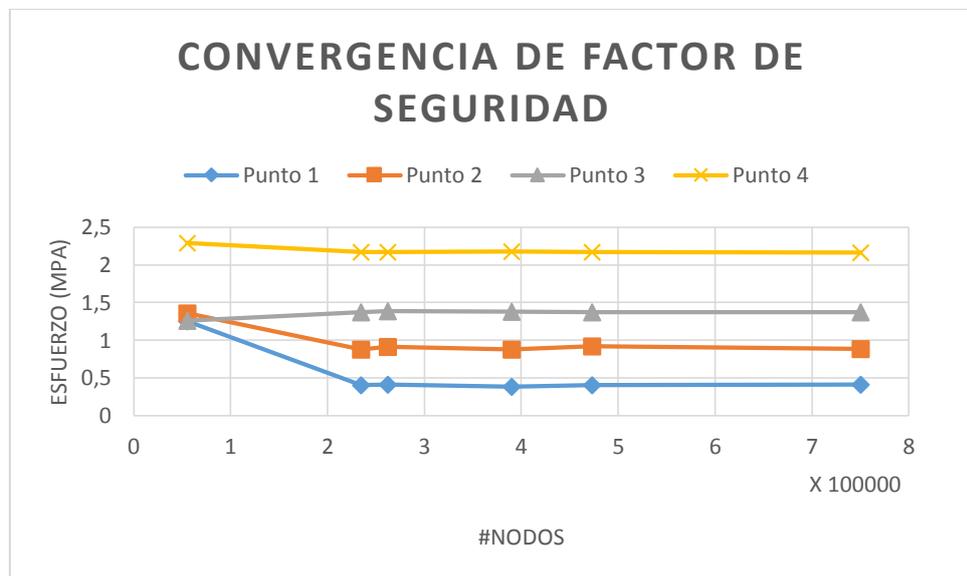


Figura 36: Convergencia de factor de seguridad en los 4 puntos de análisis

Al tener una convergencia de resultados, se escoge la malla adecuada para realizar la simulación basándose en los porcentajes de error mostrados en la tabla 4-3 y 4-4. Se utiliza la malla subrayada en amarillo en las tablas 4-3 y 4-4, con tamaño de elemento de 20 mm, con un número de nodos aproximadamente de 473203 nodos, con elementos hexaédricos.

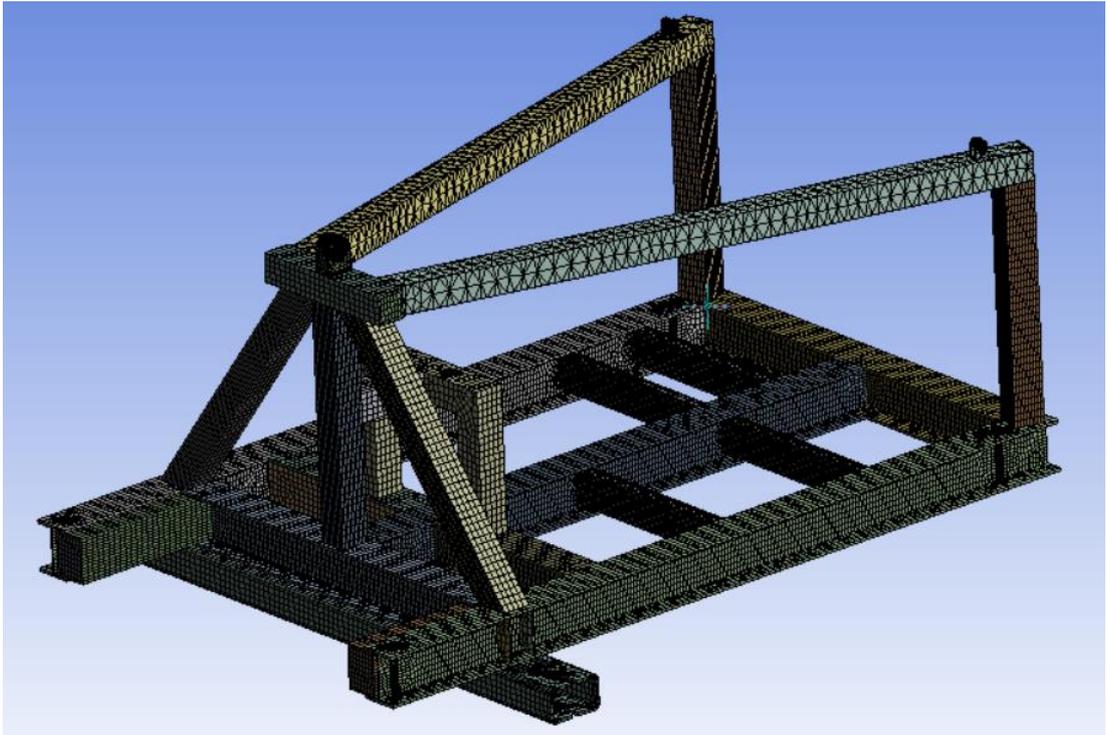


Figura 37: Mallado de la Estructura

Hay que tomar en cuenta que el número de nodos y número de elementos es aproximado, ya que al actualizar la simulación, el software crea una nueva malla con lo cual se obtienen diferente número de nodos y elementos pero dentro del mismo rango propuesto.

Los resultados obtenidos en la simulación hacen que el análisis de un posible daño de la estructura se concentre en los puntos críticos de análisis 3 con 81,09 MPa., y 4 con 50,62MPa., en los cuales se enfocará el rediseño en el capítulo 5.

Los puntos críticos obtenidos 1 y 2, se decidieron descartar para su análisis, ya que luego de analizarlos con el Departamento de Ingeniería de la Casa Matriz de la empresa, se concluyó que los mismos son concentradores de esfuerzos y se tiene una discontinuidad en los mismos, generando errores matemáticos en el cálculo de esfuerzos.

CAPITULO 5

5. OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA ACTUAL.

Después de haber realizado el análisis de las posibles fallas de la estructura, se determinó que los puntos críticos en donde el esfuerzo del material es alto y el factor de seguridad a fatiga es bajo, son los puntos 3 y 4. En estos puntos, se enfocará la optimización de la estructura actual, ya que muchas de las unidades con esta configuración ya se encuentran instaladas y en funcionamiento; el reemplazo por una unidad nueva sería una gran pérdida económica para la empresa.

Para realizar la optimización de la configuración de la estructura actual, se utilizará el criterio de aumento de área de las secciones, ya que al aumentar el área de la sección donde hay esfuerzo alto, también aumenta la inercia de la misma, y al estar relacionados de una manera inversamente proporcional la inercia con el esfuerzo, este último bajará en medida en que la inercia aumente.

5.1 OPTIMIZACIÓN POR RIGIDIZADORES

Una de las formas de optimizar la estructura es mediante rigidizadores, los cuales son económicos, fáciles de instalar y su diseño es sencillo. Existen varios tipos de rigidizadores y formas de rigidizar la estructura, como se muestra en la Figura 38; se tomaron en cuenta el rigidizador b) y c), ya que son los más utilizados.

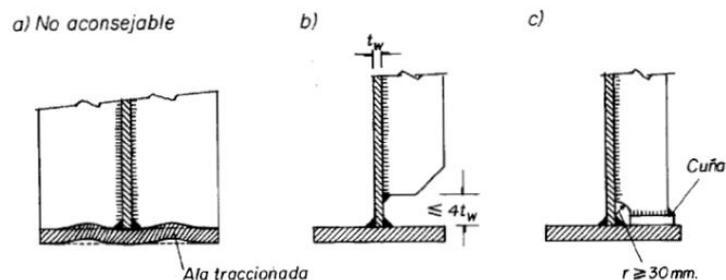


Figura 38: Tipos de rigidizadores a) soldado al ala a tracción b) soldado en el alma con espacio en ala inferior, c) rigidizador hueco de ratón

Se realizó tres diferentes ensayos indicados en las figuras 39, 40, 41.

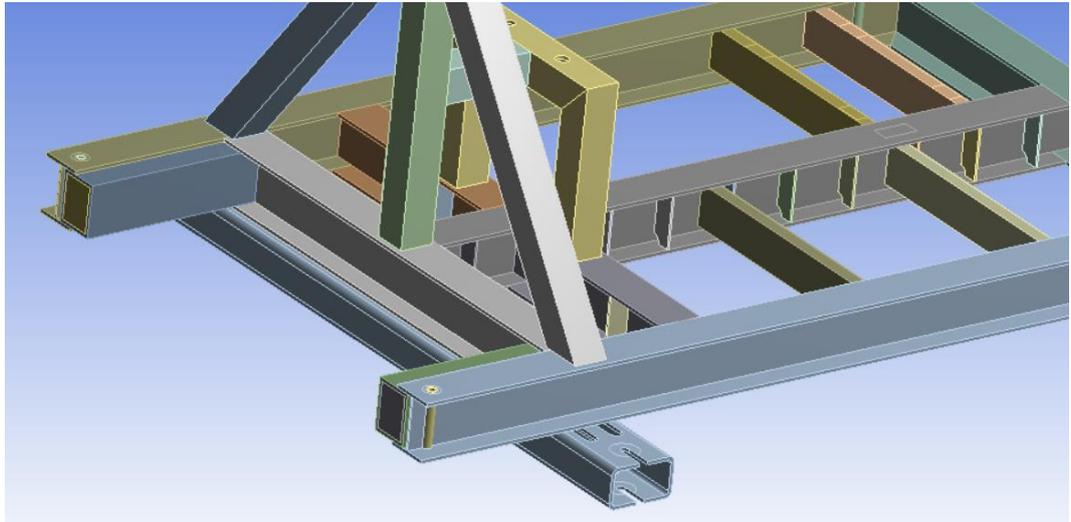


Figura 39: Ensayo 1: rigidizador hueco de ratón

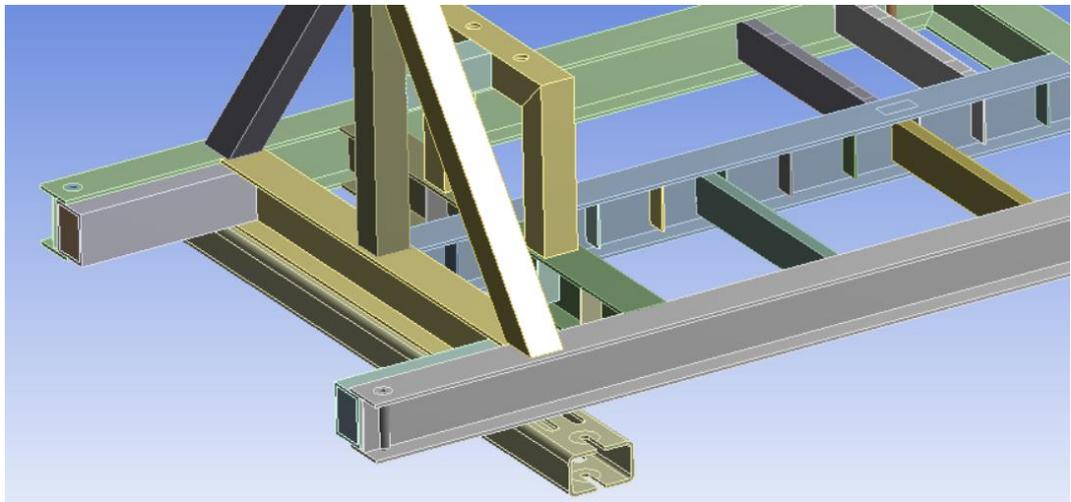


Figura 40: Ensayo 2: rigidizador espacio ala inferior

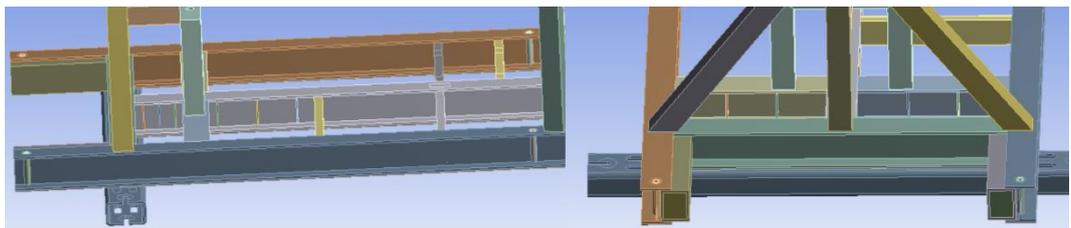


Figura41: Ensayo 3: rigidizadores espacio ala inferior con menos espacio entre rigidizador

Al realizar las simulaciones de estos ensayos, se obtuvo resultados no positivos para la optimización ya que los mismos no presentaron una mejora en los puntos de análisis, como se puede ver en la tabla 5-1 detalladamente.

Tabla 5-1
Esfuerzos de opciones de optimización por rigidizadores

MEJORAS							
#	Tipo de rigidizador	Esfuerzo original	Esfuerzo mejora	% cambio	Esfuerzo original	Esfuerzo mejora	% cambio
		Punto 3			Punto 4		
B1	rigidizador hueco de ratón	81,095	85,082	-4,92%	50,623	55,624	-9,88%
B2	rigidizador espacio ala inferior	81,095	79,897	1,48%	50,623	49,758	1,71%
B3	rigidizador espacio ala inferior menos espacio entre rigidizador	81,095	80,018	1,33%	50,623	46,702	7,75%

Con estos resultados obtenidos, se descarta la utilización de los dos tipos de rigidizadores para la optimización de los puntos 3 y 4 ya que el máximo porcentaje de mejora logrado (7.75%), se da en la opción A3 en el punto 4, pero a su vez en el punto 3, se tiene una mejora de solo el 1.33%, lo cual hace que esta propuesta no cumpla con las expectativas requeridas

5.2 OPTIMIZACIÓN POR ENCAJONAMIENTO

Con los resultados anteriores se analizó una segunda opción de optimizar la estructura. Esta propuesta se basa en un aumento de área y un cambio de geometría del elemento a optimizar.

El encajonamiento de las vigas aumenta el área de la sección y cambia la geometría de esta, con lo cual se aumenta su inercia. El encajonamiento se lo hace en las vigas donde se tiene los puntos de análisis 3 y 4 como se muestra en la figura 43.

Realizada la simulación se obtuvo resultados altamente favorables teniendo una mejora del 57,55% en el punto 3, y de 51,55% en el punto 4 detallado en la tabla 5-2.

Tabla 5-2

Detalle de optimización por encajonamiento

MEJORA							
#	Tipo de rigidizador	Esfuerzo original	Esfuerzo mejora	% cambio	Esfuerzo original	Esfuerzo mejora	% cambio
Punto 3				Punto 4			
B4	encajonado	81,095	34,425	57,55%	50,62	24,526	51,55%

Posteriormente, al realizar el encajonamiento, se generó una nueva zona donde el esfuerzo aumentó (figura 42); zona que se optimizó ubicando rigidizadores de hueco de ratón, con lo que se logró disminuir el esfuerzo.

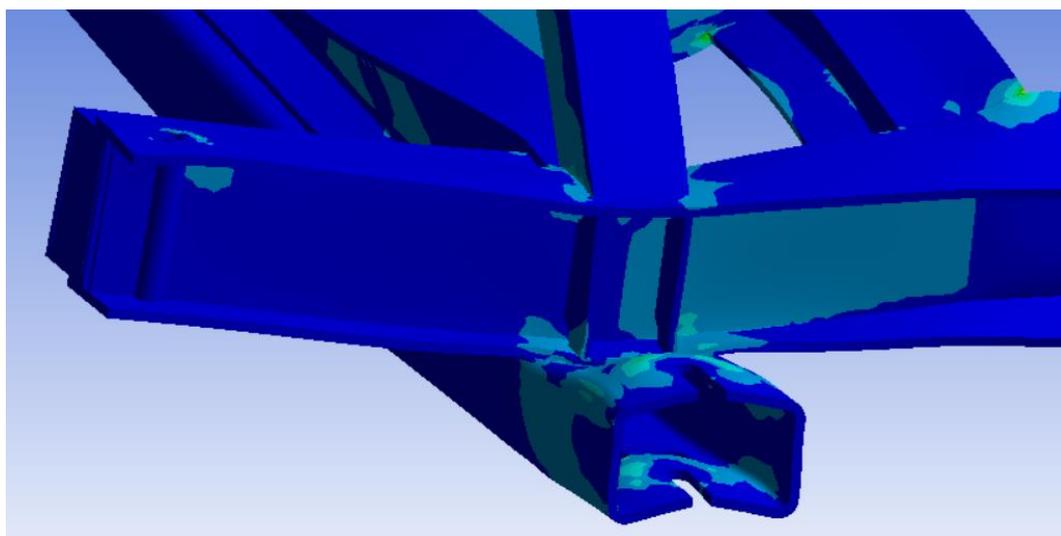


Figura 42: Nueva zona de esfuerzos generada después del encajonamiento

Con los resultados obtenidos se acepta esta opción de optimización por encajonamiento. La simulación de la optimización, se la realizó con el mallado antes establecido en la tabla 4-3 y 4-4.

En el encajonado como tal se utilizó placas de 10mm., de espesor de acero A36, tomando en cuenta los espesores del alma de la viga, las cuales fueron soldadas en ambos lados de la viga, y la utilización de rigidizadores hueco de ratón soldados solo al alma, dejando a tope la superficie con los patines superior e inferior. Los planos detallados de dimensiones se encuentran en el Anexo 1.

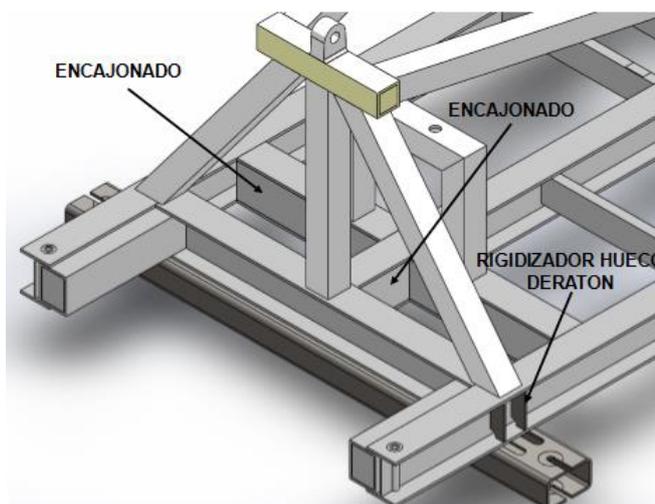


Figura 43: Optimización de la estructura

5.3 EVALUACION ECONOMICA DE LA OPTIMIZACION

La evaluación económica de la optimización se toma en cuenta, los materiales utilizados para realizar el encajonamiento, el costo de mano de obra, transporte de materiales y equipos hacia la estructura y equipos utilizados en la implementación de las mejoras.

Tabla 5-3

Detalle costos de materiales (A) optimización de la estructura.

PROYECTO: ESTRUCTURA DE OPTIMIZACION					
No	DESCRIPCION				
	MATERIALES (A)	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (\$)/u	COSTO (\$)
1	Electrodo ER 70S-6	Kg	28,00	4,3	120,422
2	Plancha de Acero A36 e= 10 mm.	kg	72,40	1,10	79,64
3	Pintura antioxidante blanco brillante	gal	2	22,00	44,00
Subtotal A					244,06

Tabla 5-4

Detalle de costos de mano de obra (B) de optimización de la estructura.

	MANO DE OBRA (B)	CANTIDAD	JORNAL (\$)/MES	COSTO HORA (\$)/h	HORAS TRABAJADAS	COSTO (\$)
4	Ingeniero Mecánico especializado	1,00	2.500,00	10,41	24,00	250,00
5	Mecánico de Obra	1,00	600,00	2,50	24,00	60,00
6	Soldador	1,00	850,00	3,54	24,00	84,96
7	Ayudante de soldador	1,00	351,00	1,46	24,00	35,04
8	Pintor	1,00	750,00	3,13	16,00	50,08
Subtotal B						480,08

Tabla 5-5

Detalle de costos de equipos utilizados en la optimización de la estructura.

	EQUIPOS (C)	UNIDAD	TARIFA (\$/unidad)	COSTO HORA (\$)/h	HORAS TRABAJADAS (h)	COSTO (\$)
9	Soldadora eléctrica 400a	Sem.	252,00	4,50	24,00	108,00
10	Compresor y Soplete	día	112,00	14,00	16,00	224,00
11	Amoladora	día	10,50	1,31	8,00	10,48
Subtotal C						342,48

Tabla 5-6

Detalle de costos de transporte materiales y equipos para optimización de estructura

	TRANSPORTE (D)	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA (\$)	COSTO (\$)
12	Transporte terrestre	1,00	1,00	250,00	250,00
Subtotal D					250,00

Tabla 5-7

Detalle de costos indirectos

ITEM	DESCRIPCION	PORCENTAJE %
1	GASTOS DE ADMINISTRACION (ARRIENDO, Luz, Agua Telefonía)	3,00
2	COSTOS FINANCIEROS	8,00
3	COSTOS DE GARANTIAS	4,75
4	UTILIDAD EMPRESARIAL	10,00
TOTAL		25,75

Tabla 5-8

Detalle de costo total de optimización

<i>COSTOS DIRECTOS = A + B + C + D (\$)</i>	1.316,62
<i>COSTOS INDIRECTOS = 25,75 % DE COSTOS DIRECTOS (\$)</i>	339,02
<i>COSTO TOTAL DE LA OPTIMIZACIÓN (\$)</i>	1655,64

5.4 COMPARACION OPTIMIZACION – COSTO

Tabla 5-9

Comparación optimización - costo

PUNTO DE ANALISIS	ESFUERZ ACTUAL (Mpa)	ESFUERZO REDISEÑO (MPa)	MEJORA (Mpa)	PRECIO OPTIMIZACION (\$)	PRECIO-MEJORA (\$/Mpa)
PUNTO 3	81,095	34,42	46,68	1.655,64	35,47
PUNTO4	60,62	24,52	36,10	1.655,64	45,86
PROMEDIO					40,66

Como se observa en la tabla 5-9, la columna de precio – mejora, se la obtiene dividiendo el precio de la optimización, para la cantidad de Mega pascales mejorados al hacer el rediseño, con lo que se tiene un precio en dólares para mejorar 1 MPa., en cada uno de los puntos de análisis; los valores de precio mejora en cada punto es diferente por lo que se realiza un promedio entre estos (40,66 \$/MPa.), para obtener un valor total de costo para realizar el rediseño y alcanzar las especificaciones planteadas.

CAPITULO 6

6. REDISEÑO

El rediseño se lo entiende en concepto como, crear o diseñar algo nuevo que cumpla las mismas funciones que lo anterior pero con mejores prestaciones.

Aplicando este concepto en este proyecto, después de haber utilizado y analizado la estructura actual y haber experimentado ciertas fallas en funcionamiento específicamente en su resistencia, se busca una nueva configuración estructural la cual soporte una carga de 40.000 lb.

Volviendo a la simulación y cálculo de esfuerzos en el literal 4.2.2, se obtuvo que los esfuerzos críticos se dan en los perfiles I en la base que sostienen la estructura denominado “bastidor principal” (elementos color azul figura 44), por lo que el rediseño se enfoca en el cambio de configuración de estos perfiles y se mantendrá la configuración actual de los tubos cuadrados, denominado “bastidor secundario” (elementos color blanco figura 45), ya que en estos elementos la estructura no presenta altos esfuerzos.

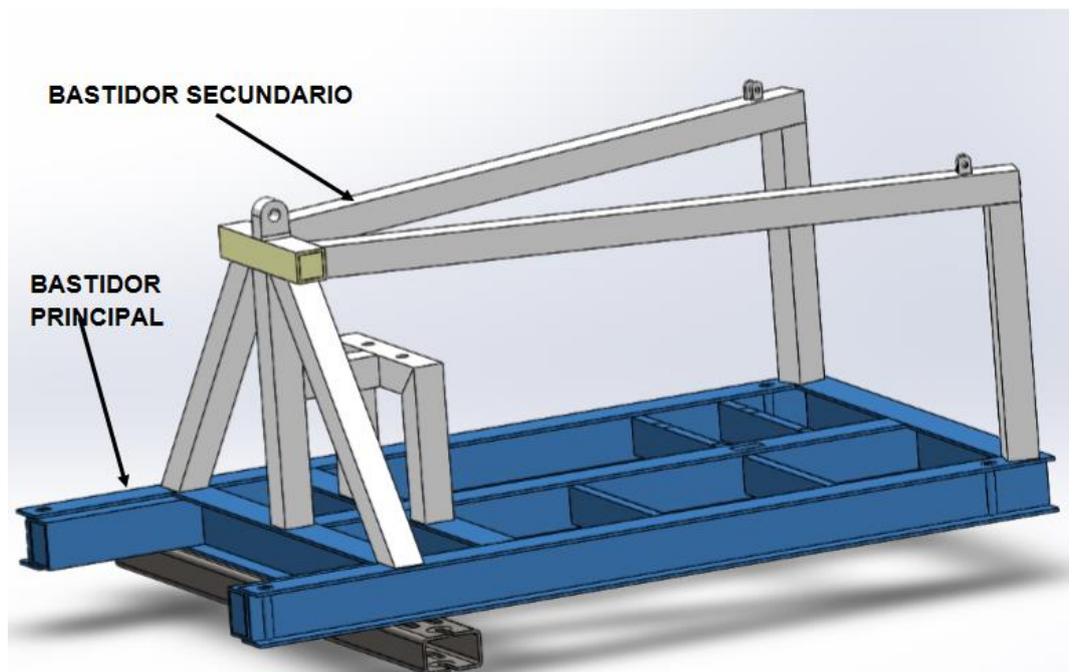


Figura44: Identificación de bastidor principal y secundario

6.1 ESPECIFICACIONES DEL REDISEÑO

Especificaciones	Detalle
Capacidad de carga	40.000 lb
Capacidad de carga de pistón	40.000 lb
Factor de Seguridad según AISC, criterio ASD	1,67
Factor de Seguridad según API	5

6.2 PROCESO DE REDISEÑO

Tanto en el proceso de diseñar y rediseñar estructuras se realizan iteraciones probando diseños y tipos de perfiles para obtener la estructura más eficiente en función del costo-resistencia.

Las iteraciones realizadas en este proceso de rediseño es el cambio de perfiles utilizando la misma configuración de la estructura actual. Las alternativas se detallan en la tabla 6-1.

Analizando la optimización realizada a la estructura en el capítulo 5, se obtuvo que el encajonamiento fue la opción que mejores resultados mostro, lo cual se debe al aumento del área y principalmente al cambio de geometría. El cambio de geometría da la pauta principal para realizar el rediseño.

Se proponen las siguientes alternativas de rediseño de la estructura, cambiando la configuración del bastidor principal, detallado en la siguiente tabla 6-1.

Tabla 6-1

Alternativas de Rediseño propuestas

Alternativa	Cambio de Perfil	Detalle
A1	W10x45 con viga de apoyo	Geometría de estructura original con perfiles W10x45
A2	W10x45 sin viga de apoyo	Geometría de estructura original con perfiles W10x45 sin viga de apoyo.
A3	W10x45 apoyo tipo1	Geometría de estructura original con perfiles W10x45, con apoyo detrás de la columna delantera
A4	W10x45 apoyo tipo 2	Geometría de estructura original con perfiles W10x45, con apoyo delante de la columna delantera
A5	W10x45 encajonado	Geometría de estructura original con perfiles W10x45, con vigas laterales encajonadas
A6	Doble C UPN 260	Geometría de estructura original con perfiles W10x45, con perfiles doble C soldados por los patines.



Figura 45: A1 - Especificación de ubicación de viga de apoyo eliminada en el rediseño

Las iteraciones realizadas son: aumentar apoyos de la estructura con el suelo (Figura 46 y 47), y un encajonado de la viga (Figura 48)

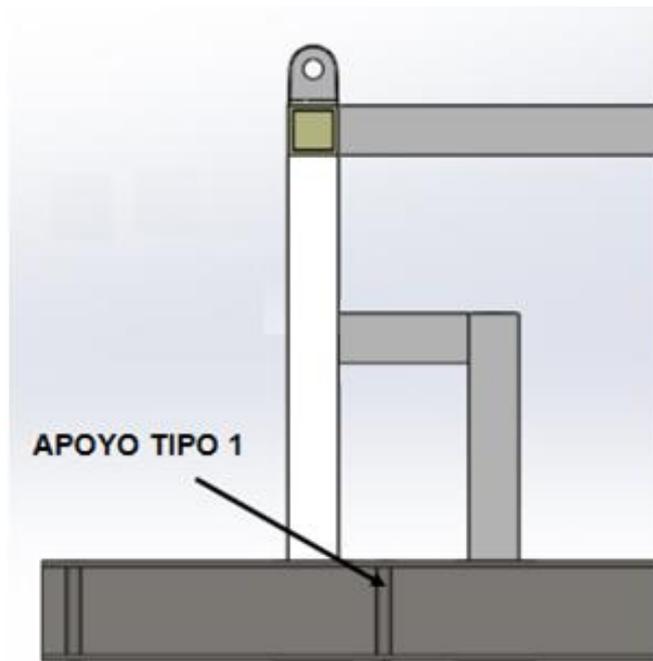


Figura 46: A3 - Identificación de apoyo tipo 1.

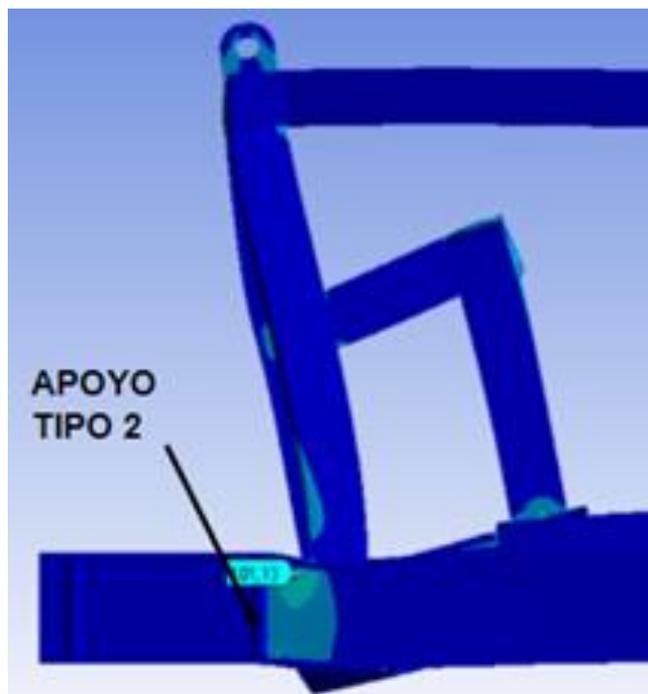


Figura47: A4 - Ubicación de los apoyo tipo 2.

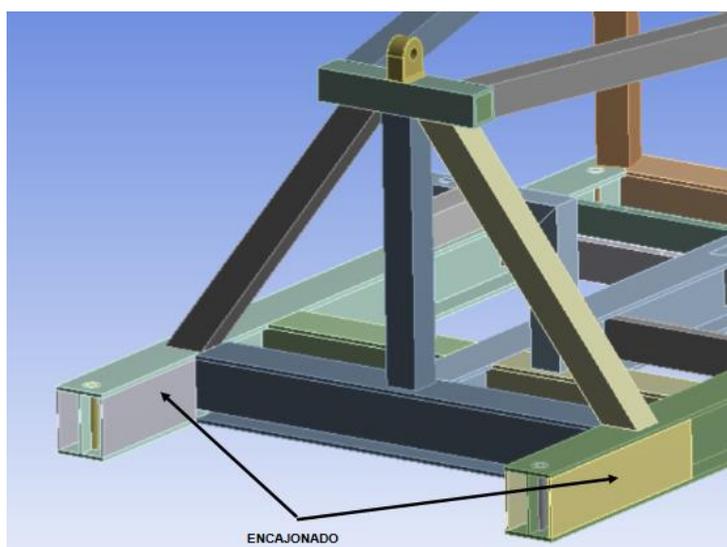


Figura48: A5 - Encajonado en vigas laterales

6.2.1 ELECCION DE ALTERNATIVAS

Realizar los modelamientos y simulaciones de todas las opciones genera un alto gasto de tiempo ingenieril, lo cual se lo puede reducir utilizando matriz de decisión (tabla 6-2, 6-3, 6-4), con la que se elegirán dos opciones con mayor peso obtenido de acuerdo al criterio del diseñador, para ser modeladas y posteriormente simuladas.

Tabla 6-2

Matriz de decisión, W.F.

CRITERIO /PARAMETRO DE EVALUACION	1	2	3	4	5	6	7	Sum	%	W.F.
1 Peso		0,5	0,5	0,7	0,5	1	4	7,2	0,18	0,18
2 Resistencia a flexo torsión	0,5		1	1	1	1	4	8,5	0,22	0,22
3 Facilidad de encontrar material	0,5	0		1	1	0,3	4	6,8	0,17	0,17
4 Precio de perfiles	0,3	0	0		0,5	0,5	4	5,3	0,14	0,14

CONTINUA →

5	Facilidad de Fabricación	0,5	0	0	0,5		0,5	4	5,5	0,14	0,14
6	Utilización extra de material	0	0	0,7	0,5	0,5		4	5,7	0,15	0,15
									39	1,00	1,00

Tabla 6-3
Calificación de alternativas

CRITERIO /PARAMETRO DE EVALUACION	ALTERNATIVAS					
	1	2	3	4	5	6
Peso	4	7	7	7	7	6
Elementos de perfiles rigidizados	3	3	3	3	7	9
Resistencia a flexo torsión	2	2	2	2	3	9
Precio de perfiles	5	5	5	5	5	7
Facilidad de Fabricación	7	7	7	7	6	7
Utilización extra de material	1	1	1	1	5	1

Tabla 6-4
Resultados de matriz de decisión

CRITERIO / PARAMETRO DE EVALUACION	W.F.	ALTERNATIVAS					
		A1	A2	A3	A4	A5	A6
		Calif	Calif	Calif	Calif.	Calif.	Calif.
Peso	0,18	0,74	1,29	1,29	10,34	9,05	7,75
Elementos de perfiles rigidizados	0,22	0,65	0,65	0,65	1,96	4,58	5,88
Resistencia a flexo torsión	0,17	0,35	0,35	0,35	0,7	1,05	3,14
Precio de perfiles	0,14	0,68	0,68	0,68	3,4	3,4	4,76
Facilidad de Fabricación	0,14	0,99	0,99	0,99	6,91	5,92	6,91
Utilización extra de material	0,15	1,46	1,46	1,46	14,62	7,31	14,62
	1,00	4,87	5,42	5,42	37,92	31,3	43,06

Al obtener los resultados de la matriz de decisión (tabla 6-4), se tiene que las dos mejores alternativas son la número A4 y A6 (resultados subrayados en rojo), que tienen la más alta calificación, pero también se tiene una tercera alternativa, la número A5 que al tener una calificación dentro del rango de las otras dos, no se la descarta, con lo cual las alternativas a simular son las A4, A5, A6 de la tabla 6-1.

6.3 SIMULACION DE REDISEÑO

La simulación de las alternativas del rediseño se realizó mediante el software de elementos finitos, con el cual se obtuvo los resultados tabulados en la tabla 6-5.

Tabla 6-5
Detalles de opciones del rediseño

ALTERNATIVAS		REDISEÑO					
		PUNTO 3			PUNTO 4		
		Esfuerzo original (MPa)	Esfuerzo mejora (MPa)	% cambio	Esfuerzo original (MPa)	Esfuerzo mejora (MPa)	% cambio
A4	W10x45 apoyo tipo 2	81,09	53,52	33,99%	50,62	35,68	29,52%
A5	W10x45 encajonado	81,09	51,05	37,05%	50,62	33,44	33,94%
A6	Perfil Doble C 260	81,09	30,06	62,93%	50,62	26,44	47,77%

El análisis comparativo de resultados en la tabla 6-5, muestra que la mejor alternativa es la A6 propuesta, en la tabla 6-1, que tiene los porcentajes de mejora más altos en los dos puntos de análisis, comparados con las otras 2 opciones elegidas, y no genera nuevas zonas de esfuerzo, con lo cual se cumple con los requerimientos de rediseño planteados por la empresa y acepta esta propuesta de rediseño.

Los planos detallados de medidas de la configuración de los perfiles doble C se encuentran en el Anexo 2.

6.4 FACTOR DE SEGURIDAD

En el diseño estructural, en base a la norma AISC, se propone un factor de corrección, el cual se lo considera como factor de seguridad. Con el criterio ASD, el factor de seguridad utilizado para la fluencia es de 1,67, a una carga estática, pero no se especifica un factor de seguridad a fatiga. En la norma API 11E, "Specification of Pumping Units", en el literal 6.3, se especifica que el diseño para componentes a flexión reversible (compresión y tracción), se lo debe hacer con un límite de esfuerzos de $0,2S_y$, esta reducción de esfuerzo se lo considera como el factor de seguridad a fatiga, el cual tiene un valor de 5.

6.4.1 CALCULO DE FACTORES DE SEGURIDAD

Según la norma API E11, el diseño para miembros a flexión reversible es de $0,2S_y$, lo que equivale a 50,6 MPa, el cual es el límite de esfuerzo recomendado que a su vez tiene un factor de seguridad de 5 respecto al límite de fluencia verdadero de material.

Para calcular el factor de seguridad se utiliza la relación del límite de esfuerzo del material, que en este caso es el límite recomendado por la norma ($0,2S_y$), dividido para el esfuerzo actuante. Esfuerzo que se obtiene sus valores de la tabla 6-5 tanto para el punto 3 y 4.

$$FS = \frac{\text{Limite de esfuerzo}}{\text{Esfuerzo actuante}}$$

$$FS3 = \frac{253}{30,06} = 8,45$$

$$FS4 = \frac{253}{26,44} = 9,47$$

Tabla 6-6

Comparación de Factor de seguridad nominal con el calculado

PUNTO DE ANALISIS	FS ESTATICO		FS FATIGA	
	FS ASD	FS CALCULADO	FS API	FS CALCULADO
PUNTO 3	1,67	8,45	5	5,86
PUNTO4	1,67	9,47	5	6,51

Los factores de seguridad calculados, tanto el factor de seguridad estático como el factor de seguridad a fatiga, cumplen con la norma ASD y con la API respectivamente, pero como se observa, estos factores de seguridad exceden en un porcentaje alto a los propuestos por las normas de diseño, lo cual se acepta teniendo en cuenta los requerimientos de rediseño propuestos por la empresa.

6.5 PLANOS Y TOLERANCIAS

Para realizar los planos se utilizó el Código de Dibujo Técnico-Mecánico, norma INEN 003. Se utilizó el método de dibujo ISO-E recomendado, así como el grupo de líneas de 0,35mm., de espesor.

Las tolerancias son de acuerdo con la norma UNE-EN_22768-1:1993 (ISO 2768-1:1989) sobre "Tolerancias lineales y angulares sin indicación individual de tolerancia", con lo que se utilizó la tolerancia clase "m" de tipo media, con lo que se tiene una tolerancia general de ± 1 .

6.6 PRESUPUESTO DEL REDISEÑO

En el diseño estructural una de las principales variables a tomar en cuenta es el peso de la estructura, el cual viene ligado directamente al costo de la misma. Con esta consideración, siempre se va a buscar una estructura de menor peso, lo que implicaría un menor costo de la misma, siempre y cuando cumpla con las condiciones de diseño, que en este caso es una carga externa máxima.

Con la propuesta de rediseño escogida se procede a realizar un análisis de costos a criterio del diseñador, para evaluar el precio de fabricación de la estructura.

6.6.1 ANALISIS DE COSTOS DE LA ESTRUCTURA ACTUAL

El análisis de costos de la estructura se la realiza detallando del precio de fabricación de la estructura, tomando en cuenta materiales (tabla 6-7), mano de obra (tabla 6-8), maquinaria y equipos a utilizar (tabla 6-9), transporte (tabla 6-10) y costos indirectos (tabla 6-12), obteniéndose el total de costo de la estructura (tabla 6-11), como se indica a continuación.

Tabla 6-7

Detalle de costos de materiales (A) de la estructura original.

No	DESCRIPCION	UNIDAD	ANALISIS		
			CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (\$/U)	COSTO (\$)
	MATERIALES (A)				
1	Perfil UPN 160	Kg	75,20	1,26	94,75
2	Vigas de Acero A36 HEB 160	Kg	666,69	1,70	1.133,37
3	Tubo rectangular 254x152.4 mm e=1/2"	6 m	2,74	1,41	3,86
4	Tubo rectangular 193x152 mm e=1/2"	6 m	1,36	1,25	1,70
5	Tubo cuadrado 5x5x1/2" p=253.2 kg	6 m	14,57	42,37	617,33
6	Anclaje pistón de acero	U	1	40,00	40,00
7	Placas de acero de 1/2"	Kg	8,15	1,15	9,37
8	Perforación en vigas	U	4	25,00	100,00
9	Perforación en tubo	U	2	25,00	50,00
10	Cilindros de perforación en vigas	U	4,00	20,00	80,00
11	Electrodo ER 70S-6	Kg	65,00	4,30	279,50
12	Pintura antioxidante blanco brillante	gal	7	22,00	154,00
Subtotal A					2.563,89

Tabla 6-8

Detalle de costos de mano de obra (B) de la estructura original

	MANO DE OBRA (B)	CANTIDAD	JORNAL (\$/MES)	COSTO		COSTO (\$)
				HORA (\$)/h	HORAS TRABAJADAS (h)	
13	Ingeniero Mecánico especializado	1,00	2.500,00	10,42	160,00	1.666,67
14	Mecánico de Obra	1,00	600,00	2,50	80,00	200,00
15	Ayudante de obra	1,00	351,00	1,46	80,00	116,80
16	Soldador	1,00	850,00	3,54	80,00	283,33
17	Ayudante de soldador	1,00	351,00	1,46	80,00	116,80
18	Pintor	1,00	750,00	3,13	40,00	125,00
Subtotal B						2.508,60

Tabla 6-9

Detalle de costos de maquinaria y equipo (C) de la estructura original

	EQUIPOS (C)	UNIDAD	TARIFA (\$/MES)	COSTO HORA (\$)	HORAS TRABAJADAS (h)	COSTO (\$)
20	Alquiler del montacargas	día	264,00	33,00	20,00	660,00
21	Soldadora eléctrica 400a	Sem.	252,00	6,30	120,00	756,00
22	Compresor y Soplete	día	112,00	14,00	40,00	560,00
23	Amoladora	día	10,50	1,31	40,00	52,40
Subtotal C						2.028,40

Tabla 6-10

Detalle de costos de transporte (D) de la estructura original

	TRANSPORTE (D)	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA (\$)	COSTO (\$)
24	Transporte terrestre	1,00	1,00	500,00	500,00
25	Transporte fluvial	1,00	1,00	900,00	900,00
Subtotal D					1.400,00

Tabla 6-11

Total de costos Directos

<i>COSTOS DIRECTOS = A + B + C + D (\$)</i>	8.500,89
--	-----------------

Tabla 6-12

Detalle de costos indirectos

ITEM	DESCRIPCION	PORCENTAJE %
1	GASTOS DE ADMINISTRACION (ARRIENDO, Luz, Agua Telefonía)	3,00
2	COSTOS FINANCIEROS	8,00
3	COSTOS DE GARANTIAS	4,75
4	UTILIDAD EMPRESARIAL	10,00
	TOTAL	25,75

Tabla 6-13

Detalle de costo total de la estructura original

<i>COSTOS INDIRECTOS = 25,75 % DE COSTOS DIRECTOS (\$)</i>	2.188,98
<i>COSTO TOTAL DE LA ESTRUCTURA (\$)</i>	10.689,87

6.6.2 ANALISIS DE COSTOS DEL REDISEÑO DE LA ESTRUCTURA.

La propuesta de rediseño de la estructura se basó en el cambio de perfil I, por perfil armado con doble C UPN 260, formando una geometría rectangular.

Tabla 6-14

Detalle de costos de materiales (A) del rediseño de la estructura

No	DESCRIPCION				
	MATERIALES (A)	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (\$)/u	COSTO (\$)
1	Perfil UPN 160	Kg	75,20	1,26	94,75
2	Vigas de Acero doble C UPN 260	Kg	1.419,00	1,45	2.057,55
3	Tubo cuadrado 5x5x1/2" p=253.2 kg	6 m	14,57	42,37	617,33
4	Anclaje pistón de acero	U	1	40,00	40,00
5	Placas de acero de 1/2"	Kg	5,00	1,15	5,75
6	Perforación en vigas	U	6	25,00	150,00
7	Cilindros de perforación en vigas	U	4,00	20,00	80,00
8	Electrodo ER 70S-6	Kg	81,00	4,30	348,30
9	Pintura antioxidante blanco brillante	Gal	7	22,00	154,00
Subtotal A					3.547,68

Tabla 6-15

Detalle de costos de mano de obra (B) utilizada en el rediseño de la estructura

	MANO DE OBRA (B)	CANTIDAD	JORNAL (\$/MES)	COSTO HORA (\$)/h	HORAS TRABAJADAS (h)	COSTO (\$)
10	Ingeniero Mecánico especializado	1,00	2.500,00	10,42	100,00	1.041,67
11	Mecánico de Obra	1,00	600,00	2,50	80,00	200,00
12	Ayudante de obra	1,00	351,00	1,46	80,00	116,80
13	Soldador	1,00	850,00	3,54	80,00	283,33
14	Ayudante de solador	1,00	351,00	1,46	80,00	116,80
15	Pintor	1,00	750,00	3,13	40,00	125,00
Subtotal B					1.883,60	

Tabla 6-16

Detalle de costos de maquinaria y equipos (C) utilizados en el rediseño de la estructura.

	EQUIPOS (C)	UNIDAD	TARIFA (\$/unidad)	COSTO HORA (\$/h)	HORAS TRABAJADAS (h)	COSTO (\$)
16	Alquiler del montacargas	Día	264,00	33,00	20,00	660,00
17	Soldadora eléctrica 400a	Sem	252,00	4,50	120,00	540,00
18	Compresor y Soplete	Día	112,00	14,00	80,00	1.120,00
19	Amoladora	Día	10,50	1,31	80,00	104,80
Subtotal C						2.424,80

Tabla 6-17

Detalle de costos del transporte del rediseño de la estructura

	TRANSPORTE (D)	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA (\$)	COSTO (\$)
20	Transporte terrestre	1,00	1,00	900,00	500,00
21	Transporte fluvial	1,00	1,00	900,00	900,00
Subtotal D					1.400,00

Tabla 6-18

Subtotal de costos directos del rediseño de la estructura.

COSTOS DIRECTOS = A + B + C + D (\$)	9.256,44
---	-----------------

Tabla 6-19

Detalle de costos indirectos del rediseño de la estructura.

ITEM	DESCRIPCION	PORCENTAJE %
1	GASTOS DE ADMINISTRACION (ARRIENDO, Luz, Agua Telefonía)	3,00
2	COSTOS FINANCIEROS	8,00
3	COSTOS DE GARANTIAS	4,75
4	UTILIDAD EMPRESARIAL	10,00
TOTAL		25,75

Tabla 6-20**Detalle de costo total del rediseño de la estructura.**

<i>COSTOS INDIRECTOS = 25,75 % DE COSTOS DIRECTOS (\$)</i>	2.383,44
COSTO TOTAL DE LA ESTRUCTURA (\$)	11.639,52

6.6.3 COMPARACION REDISEÑO - COSTO

La comparación rediseño – costo de la estructura, se enfoca en los porcentajes de mejora o cambio obtenido con el rediseño propuesto y lo que se invirtió en realizar la actual estructura, lo cual se detalla a continuación en la tabla 6-21.

Tabla 6-21**Comparación rediseño – costo de la estructura.**

PUNTO DE ANALISIS	ESFUERZO ACTUAL (MPa)	ESFUERZO REDISEÑO (MPa)	MEJORA (MPa)	PRECIO ACTUAL (\$)	PRECIO REDISEÑO (\$)	DIFERENCIA DE PRECIO	PRECIO-MEJORA (\$/MPa)
PUNTO 3	81,095	30,06	51,04	10.689,87	11.639,52	949,65	18,60
PUNTO4	60,62	26,4	34,22	10.689,87	11.639,52	949,65	27,75
PROMEDIO COSTO DE MEJORA							23,17

Como se observa en la tabla 6-15, la columna de precio – mejora, se la obtiene dividiendo la diferencia de precio de las estructuras, para la Mejora (MPa), cantidad de Mega pascales mejorados al hacer el rediseño, con lo que se tiene un precio en dólares para mejorar 1 MPa., en cada uno de los puntos de análisis; los valores de precio mejora en cada punto es diferente por lo que se realiza un promedio entre estos (23,17 \$/MPa.), para obtener un valor total de costo para realizar el rediseño y alcanzar las especificaciones planteadas.

CAPITULO 7

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- El objetivo de mejorar la resistencia de la estructura a 40000lb., se logró tanto en la optimización, como en el rediseño propuesto.
- Mediante la simulación con el software de elementos finitos, se determinó los puntos críticos dentro de la estructura, los cuales son 4. Se descartaron dos, el punto 1 y 2, por cuanto estos son concentradores de tensión y se obtiene un error de discontinuidad lo que crea resultados no precisos. Por lo tanto, los puntos de análisis son el 3 y 4, los cuales tienen una futura posible falla por los altos ciclos de trabajo en que funciona la unidad y un área pequeña de la sección del perfil, lo que haría que la estructura falle por fatiga de sus elementos.
- La optimización de la estructura se realizó mediante el proceso de encajonamiento de los miembros, en los puntos de análisis 3 y 4, descartando el uso de rigidizadores ya que los resultados obtenidos con rigidizadores fue de 7,75% de mejora a comparación del encajonamiento, con lo que se disminuyó el esfuerzo de 81,09 MPa. a 34,42 MPa., en el punto 3 con un 57,55% de mejora y de 50,62 MPa., a 24,52 MPa., en el punto 4 con un 51,55% de mejora.
- Se logró rediseñar la estructura del equipo de bombeo mecánico de petróleo, mediante un proceso de elección de alternativas basándose en los principios de diseño estructural y en las posibles fallas determinadas en la simulación, con lo que se eligió la opción A6, utilizando perfiles doble C UPN 260, llegando a una mejora de 62,93% en el punto 3, bajando el esfuerzo de 81,09 MPa., a 30,06 MPa., y en el punto 4 una mejora de 47,77% con un esfuerzo de 50,62 MPa. a 26,44 MPa. Con estos valores se cumple con las condiciones

propuestas de rediseño llegando a un factor de seguridad estático en el punto 3 de 8,45 y punto 4 de 9,47, lo cual cumple con la norma AISC con el criterio ASD, y un factor de seguridad a fatiga de 5,86 en el punto 3 y de 6,51 en el punto 4 con lo que cumple con el factor de seguridad planteado en la norma API 11E, "Specification of Pumping Units". De la misma forma la estructura cumple con la carga máxima planteada de 40000 lb.

- Como resultado de la simulación en el software de elementos finitos, se obtuvieron las reacciones RB y RCx, con valores de 6875,84 N y 1445,36 N respectivamente, las cuales son transmitidas a la estructura principal, teniendo unas fuerzas actuantes reales de RBy=5880 N y RCy=1524,7 N. Los valores obtenidos en la simulación se comprobaron con el cálculo mediante un procedimiento de elementos finitos en cual involucra la teoría de armaduras metálicas realizando un programa que permite la optimización del tiempo de cálculo de las deformaciones.
- Para el cálculo de esfuerzos se realizó una convergencia de resultados en base a la malla, con lo cual se asegura una precisión de resultados, utilizando los valores del ensayo 5 de la tabla 4-3 y 4-4, con esfuerzos de 81,09 MPa., y 50,62 MPa.
- En base a un análisis de costos de la estructura actual y el rediseño planteado se obtuvo que el costo de la estructura rediseñada es de 11.639,52 dólares, con lo que se obtiene un promedio de inversión de 23,17 dólares para mejorar un MPa., con lo que a comparación de la inversión para realizar la optimización la cual es de 40,66 dólares, el rediseño es la mejor opción y da una mayor confiabilidad para el funcionamiento a altos ciclos de trabajo y una resistencia a fatiga.

7.2 RECOMENDACIONES

- Revisar la teoría de elementos finitos aplicada en el cálculo de armaduras metálicas propuesta en el libro utilizado, para no errar en el ingreso de los datos y obtener resultados verídicos, los cuales posteriormente se compararán con la simulación en los diferentes software.
- Tener en cuenta todos los tipos de juntas y puntos donde se aplica la carga y anclaje del diseño de la estructura, ya que al momento de ingreso de datos de la simulación es de gran importancia estos factores y valores, para una recreación lo más real posible.
- Realizar siempre una convergencia de mallado ya que esto ayuda a una obtención de resultados precisos y acorde con la realidad. La utilización de elementos hexaédricos es la que mejores resultados arroja, junto con un mallado fino. Tomar en cuenta las dimensiones y aristas del modelo a simular, ya que esto influye en el gasto computacional e ingenieril requerido ya que para realizar estas simulaciones se requiere computadores con alta capacidad de procesamiento.
- Realizar un estudio más afondo sobre atiezadores y optimización de skids de longitud corta ya que no existe información amplia sobre el tema y se realizó la optimización solo en base a teoría de inercia y aumento de sección por experimentación, por lo cual y el estudio a fondo de estos requiere otro proyecto enfocado directamente a analizar los diferentes tipos y configuración de atiezadores.
- Tener en cuenta el análisis económico realizado ya que en el mercado actual, cada momento cambia de precios tanto de materia prima como mano de obra y el costo promedio para mejora de un MPa., puede variar.
- Realizar un estudio para un mejoramiento de la eficiencia en consumo de energía de la unidad de bombeo mecánico de petróleo, ya que al momento se tiene un alto índice de consumo de energía eléctrica y esto

significa un punto en contra a la hora de competir con otras unidades de bombeo mecánico. Se propone un sistema de contrabalanceo, anexando dos cilindros neumáticos paralelos al cilindro principal conectados al eje de las dos poleas, con lo cual se tendría una disminución en el consumo de energía de la bomba hidráulica, tanto en la carrera de subida como en la carrera de bajada. Hay que tener en cuenta que al agregar este sistema neumático se requiere un estudio de factibilidad y porcentaje de mejora en consumo de energía obtenida ya que se requeriría otro rediseño estructural y aumentar un sistema neumático.

8. BIBLIOGRAFIA

- AISC. (2005). Steel Construction Manual .
- ASTM. (2003). *Standar Practice for Analysis of Strain Gage Rosette Data*.
- Chanaluisa, J. C. (2008). Unidad de Bombeo Balanceada por Alre. Ecuador: Manual Lufkin.
- García Danner, B., Condori Parra , L., Fuentes Ajata , D., García Villarroel , E. A., Guzmán Chávez , G., Rodríguez Cuellar , I., & Vicuña Linarez , G. R. (s.f.). Obtenido de <http://dc390.4shared.com/doc/I7-uGiH-/preview.html>
- Halliburton. (2013). Halliburton MaxiStroke™ Surface Rod Pumping (SRP) Unit. *Halliburton MaxiStroke™ Surface Rod Pumping (SRP) Unit* , 2.
- Madrid, M. (2009). *Portal de Petroleo*. Obtenido de <http://www.portaldelpetroleo.com/2009/06/bombeo-mecanico-diseno.html>
- Marin, Y. (Noviembre de 2012). *Monografias*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos101/bombeomecanico/bombeomecanico.shtml>
- Norma API 11E. (2008). *Specification for Pumping Units*. Whashington, DC.
- Odin Petrotech Development Co., L. (s.f.). Obtenido de http://es.made-in-china.com/co_odinpetrotech1/product_Rotaflex-Pumping-Unit_huyhgneyy.html
- OilMail. (s.f.). *OilMail*. Obtenido de <http://oil-mail.blogspot.com/2011/05/sistema-de-levantamiento-artificial-por.html>
- Rodriguez, H. S. (Febrero de 2006). Tensión. Morella, Mexico.
- Sertecpet. (s.f.).
- “Introducción al Estudio del Elemento Finito en Ingeniería”, Segunda Edición, de Tirupathi R. Chandrupatla.

9. ANEXOS

9.1 ANEXO 1 – PLANOS DE OPTMIMIZACION

9.2 ANEXO 2 – PLANOS DE REDISEÑO

9.3 ANEXO 3 – CATALOGO DE PERFILES UPN DIPAC



PERFILES LAMINADOS UPN

Especificaciones Generales

Calidad	ASTM A36
Otras calidades	Previa Consulta
Largo normal	6.00m y 12.00m
Otros largos	Previa Consulta
Acabado	Natural
Otro acabado	Previa Consulta



DENOMINACION	DIMENSIONES						TIPOS					
	h	s	g	t	R	R1	SECCION	PESOS	Ix	Iy	Wx	Wy
	mm	mm	mm	mm	mm	cm4	cm2	kg/mt	cm4	cm4	cm3	cm3
UPN 50	50	38	5.00	7.00	7.00	3.50	7.12	5.59	26.40	9.12	10.60	3.75
UPN 65	65	42	5.50	7.50	7.50	4.00	9.03	7.09	57.50	14.10	17.70	5.07
UPN 80	80	45	6.00	8.00	8.00	4.00	1.10	8.64	106.00	19.40	26.50	6.36
UPN 100	100	50	6.00	8.50	8.50	4.50	13.50	10.60	206.00	29.30	41.20	8.49
UPN 120	120	55	7.00	9.00	9.00	4.50	17.00	13.40	364.00	43.20	60.70	11.10
UPN 140	140	60	7.00	10.00	10.00	5.00	20.40	16.00	605.00	62.70	86.40	14.80
UPN 160	160	65	7.50	10.50	10.50	5.50	24.00	18.80	905.00	85.30	116.00	18.30
UPN 180	180	70	8.00	11.00	11.00	5.50	28.00	22.00	1350.00	114.00	150.00	22.40
UPN 200	200	75	8.50	11.50	11.50	6.00	32.20	25.30	1910.00	148.00	191.00	27.00
UPN 220	220	80	9.00	12.50	12.50	6.50	37.40	29.40	2690.00	197.00	245.00	33.60
UPN 240	240	85	9.50	13.00	13.00	6.50	42.30	33.20	3600.00	248.00	300.00	39.60
UPN 260	260	90	10.00	14.00	14.00	7.00	48.30	37.90	4820.00	317.00	371.00	47.70
UPN 300	300	100	10.00	16.00	16.00	8.00	58.80	46.20	8030.00	495.00	535.00	67.80