



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### DISEÑO Y SIMULACIÓN DE TRENES DE POLEAS PARA LAS PILONAS DEL SISTEMA TELEFÉRICO PROYECTO QUITO CABLES.

#### TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**CABRERA MONTALVO CRISTIAN DAVID**

cristian.cabrera@epn.edu.ec

**CAMPAÑA REYES SANTIAGO FERNANDO**

santiago.campana@epn.edu.ec

**DIRECTOR: ING. BALDEÓN VALENCIA CARLOS OSWALDO**

carlos.baldeon@epn.edu.ec

**CODIRECTOR: ING. GRANJA RAMÍREZ MARIO GERMÁN**

mario.granja@epn.edu.ec

Quito, enero 2020

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores Cristian David Cabrera Montalvo y Santiago Fernando Campaña Reyes, bajo mi supervisión.

---

Ing. Carlos Oswaldo Baldeón Valencia  
DIRECTOR DE PROYECTO

---

Ing. Mario Germán Granja Ramírez  
CO-DIRECTOR DE PROYECTO

## DECLARACIÓN

Nosotros, Cristian David Cabrera Montalvo y Santiago Fernando Campaña Reyes, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento. A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Cristian David Cabrera Montalvo

---

Santiago Fernando Campaña Reyes

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios y a mis Padres por permitirme cumplir una de mis metas, agradezco sus enseñanzas y el ejemplo que me impartieron a través de mi vida, con toda seguridad puedo llamarlos mis héroes y quiero decirles que son las personas en quien me quiero convertir. También doy las gracias a mi compañero y amigo Santiago Campaña que juntos hemos realizado este trabajo de suma importancia. A mi director de tesis Carlos Baldeón y codirector Mario granja que han sido mentores en el transcurso de mi educación superior y es para mí un honor poder preséntales mi trabajo de titulación.

Cristian

## AGRADECIMIENTO

A mis padres, Flor y Ramiro, los principales gestores de cada uno de los triunfos cosechados durante toda mi existencia; sin ellos este reto llamado vida no sería tan interesante. A Mayra, quien, en lugar de ser una hermana, ha logrado ser una segunda madre, la cual me ha apoyado de manera incondicional en cada desafío nuevo. A Paúl, quien ha sabido cumplir con un papel de padre conmigo durante toda la vida; gracias por nunca negarte a respaldar cada una de las decisiones que han sido trascendentales para mí. A los dos seres que me han llenado de alegría durante todos estos años, Alexander y Cristian; ustedes siendo tan pequeños le han dado un sentido muy valioso a mis días. A Sebastián, un hermano más, quien siempre ha sido un apoyo fundamental para todos mis proyectos, estando presente en cada una de las etapas que he vivido. A toda mi familia Campaña-Reyes, gracias por siempre estar pendientes de mí, la confianza de cada uno de ustedes ha hecho que cada día vaya por más. A una de las personas que me ha criado, me ha visto crecer en cada una de las etapas y que ha sido un apoyo fundamental por casi 20 años, Blanca, gracias por quererme y tratarme como un hijo más.

A Gemma, mi novia, que desde el momento en que llegó a mi vida ha sabido ser fuente de inspiración y motivación; el tenerte en mi vida sin duda alguna es una de las oportunidades más maravillosas que me ha dado la vida.

Al Ing. Carlos Baldeón, uno de mis principales mentores; gracias por inspirarme y enseñarme que los éxitos y triunfos llegan cuando uno realmente se lo propone. Al Ing. Mario Granja, por su apoyo en el desarrollo del presente proyecto y por ser un maestro en todos sus sentidos. A mi compañero de tesis, Cristian; por trabajar de manera ardua conjuntamente para el desarrollo de este estudio.

A mi grupo de amigos de la mejor facultad del mundo, los cuales han hecho que estos años sean realmente inolvidables. A toda la familia ASME, que me ha apoyado constantemente cada una de las iniciativas a las cuales hemos decidido enfrentarnos, cosechando varios triunfos locales e internacionales.

Santiago

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a las personas que me inspiran cada día a ser mejor y tener una razón para seguir luchando a mis Padres Mirian Montalvo, David Cabrera y a mi pequeño hijo Juan David Cabrera; los amo mucho, todo mi esfuerzo es por ustedes.

Cristian

Este trabajo se lo dedico a Flor Reyes, Ramiro Campaña, Mayra Campaña, Paúl Campaña, Alexander Campaña, Cristian Reyes, Luis Campaña, Jorge Reyes y Cecilia Navarrete; personas que han realizado muchos sacrificios por verme crecer.

Santiago

## CONTENIDO

CERTIFICACIÓN .....	i
DECLARACIÓN .....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
DEDICATORIA.....	v
RESUMEN .....	xviii
ABSTRACT .....	xix
INTRODUCCIÓN. ....	1
Objetivo general. ....	3
Objetivos específicos.....	3
1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Sistemas de transporte por cable.....	4
1.2. Elementos de los Sistemas de transporte por teleféricos.....	5
1.2.1. Estaciones.....	5
1.2.2. Sistema motriz.....	7
1.2.3. Línea de transporte.....	7
1.2.4. Sistema de control del teleférico.....	8
1.2.5. Cabinas o vehículos. ....	9
1.3. Sistemas de trenes de Poleas en teleféricos.....	10
1.4. Tipología de trenes de poleas. ....	10
1.4.1. Trenes de Poleas a tracción. ....	11
1.4.2. Trenes de Poleas a compresión. ....	11
1.4.3. Trenes de Poleas a Tracción y compresión.....	11
1.5. Cargas a las que se encuentran sometidos los trenes de poleas. ....	12
1.6. Generalidades del proyecto Quito-Cables.....	13
2. METODOLOGÍA.....	15

2.1.	Definición del producto.....	15
2.1.1.	Casa de la calidad .....	15
2.1.2.	Especificaciones para el mecanismo.....	16
2.2.	Diseño Conceptual.....	17
2.2.1.	Diagramas de funciones.....	17
2.2.2.	Matriz de criterios ponderados.....	19
2.3.	Diseño de materialización.....	24
2.3.1.	Determinación y análisis de las cargas a las que estará sujeto el mecanismo.....	25
2.3.1.1.	Combinaciones de carga (ASD). [13] .....	27
2.3.1.2.	Cálculo de cargas.....	28
2.3.1.3.	Ejemplo de cálculo.....	29
2.3.1.4.	Modelación del trazado mediante SAP 2000.....	32
2.3.2.	Determinación del número de poleas.....	35
2.3.3.	Dimensionamiento de ejes.....	42
2.3.3.1.	Determinación de cargas.....	43
2.3.3.2.	Determinación de esfuerzos en sus respectivas direcciones.....	43
2.3.3.3.	Determinar la teoría de falla de los materiales.....	44
2.3.3.4.	Determinar esfuerzos equivalentes.....	44
2.3.3.5.	Determinar la teoría de falla a fatiga.....	46
2.3.3.6.	Definir una fórmula para el dimensionamiento de ejes en base a criterios de falla a fatiga y las teorías de falla por energía de distorsión.....	46
2.3.3.7.	Ejemplo de cálculo: Tren De poleas de 12, Pilona 17.....	49
2.3.4.	Dimensionamiento de poleas y selección de rodamientos.....	81
2.3.4.1.	Ejemplo de cálculo. Tren de 12 poleas, Pilona 17.....	83
2.3.5.	Dimensionamiento de vigas.....	85

2.3.5.1.	Ejemplo de cálculo, Viga principal y secundaria para el tren de 12 poleas, Pilonas 17.	87
2.3.6.	Dimensionamiento de placas de conexión críticas.	89
2.3.6.1.	Dimensionamiento Placa principal del soporte, tren de 12 poleas, Pilonas 17.	91
2.3.6.2.	Dimensionamiento de placa de conexión viga principal.	92
2.3.6.3.	Dimensionamiento placa de izaje.	93
2.3.7.	Conexiones Soldadas críticas.	95
2.3.7.1.	Soldadura en la placa de izaje	96
2.3.7.2.	Soldadura de placa de conexión de la viga principal.	98
2.3.7.3.	Soldadura de placa de conexión de la viga secundaria.	99
2.3.8.	Conexiones empernadas críticas.	101
2.3.8.1.	Dimensionamiento de los pernos del Anti-descarrilador.	102
2.3.9.	Conexiones con espárragos.	103
2.4.	Desagregación tecnológica.	105
2.4.1.	Polea	108
2.4.2.	Tapa de la polea	109
2.4.3.	Placa par de poleas	109
2.4.4.	Placa de conexión de 4 poleas	110
2.4.5.	Bocín	111
2.4.6.	Eje tipo 1	111
2.4.7.	Eje tipo 2	112
2.4.8.	Antidescarrilador	112
2.4.9.	Chapa guía del cable	113
2.4.10.	Topes Anti-rotación	114
2.4.11.	Viga principal	115

2.4.12. Placas especiales .....	115
2.4.13. Soporte .....	116
2.4.14. Placa de Izaje .....	117
2.4.15. Viga Secundaria .....	117
2.4.16. Placa del tren mixto .....	118
2.4.17. Soporte tren Mixto .....	119
2.4.18. Placa retenedora. ....	119
2.5. Ingeniería de costos. ....	121
2.6. Simulaciones de elementos críticos del sistema de trenes de poleas. ....	129
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	138
3.1. Resultados del dimensionamiento de acuerdo con su tipología.....	138
3.2. Resultados de las simulaciones .....	140
3.2.1. Resultados de la simulación del eje de 1 Polea.....	141
3.2.2. Resultados de la simulación del eje para 2 poleas tipo largo .....	142
3.2.3. Resultados de la simulación del eje para 2 poleas .....	144
3.2.4. Resultados de la simulación del eje para 4 poleas.....	145
3.2.5. Resultados de la simulación del eje para 6 poleas.....	147
3.2.6. Resultados de la simulación del eje para 12 poleas.....	148
3.2.7. Resultados de la simulación de la placa de conexión principal. ....	150
3.2.8. Resumen de Resultados.....	151
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	152
4.1. Conclusiones.....	152
4.2. Recomendaciones.....	153
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	156
ANEXOS .....	159

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Funicular.....	4
Figura 1.2. Cabina y telesilla.....	5
Figura 1.3. Estación de transferencia Libertador, Bolivia.....	6
Figura 1.4. Sistema motriz teleférico Zugspitze, Alemania.....	7
Figura 1.5. Pilonas o torres.....	8
Figura 1.6. Esquema del cable tractor-portador.....	8
Figura 1.7. Centro de control y operaciones del teleférico Funchal-Monte, Portugal. .....	9
Figura 1.8. Vehículo o cabina.....	9
Figura 1.9. Esquema tren de poleas a tracción.....	11
Figura 1.10. Esquema tren de poleas a compresión.....	11
Figura 1.11. Esquema tren de poleas mixto.....	12
Figura 1.12. Trazado de la línea Ofelia-Roldós.....	14
Figura 2.1. Casa de la calidad descripción.....	16
Figura 2.2. Diagrama de funcionalidad, primer nivel.....	18
Figura 2.3. Diagrama de funcionalidad de segundo nivel.....	18
Figura 2.4. Diagrama de funcionalidad de tercer nivel.....	18
Figura 2.5. Alternativa 1.....	20
Figura 2.6. Alternativa 2.....	20
Figura 2.7. Alternativa 3.....	20
Figura 2.8. Carga vs Desplazamiento ACERO suave- Métodos de Diseño. [Fuente: Propia].....	24
Figura 2.9.. Trazado: Línea Ofelia-Roldós.....	32
Figura 2.10. Propiedades del material-CABLE.....	32
Figura 2.11. Propiedades geométricas-CABLE.....	33

Figura 2.12. Cargas NEC-2015.....	33
Figura 2.13. Propiedades geométricas-CABLE.....	35
Figura 2.14. Longitud mínima del balancín.....	39
Figura 2.15. Diagrama de fuerzas y momento flector Eje 1 polea-tren 12.....	50
Figura 2.16'. Curvas de falla Se' .....	53
Figura 2.17. Curvas de Falla " Se real" .....	54
Figura 2.18. Diagrama de fuerzas y momento flector Eje 2 poleas-tren 12.....	56
Figura 2.19. Curvas de falla Se' Eje 2 Poleas corto .....	58
Figura 2.20. Curvas de Falla " Se real" .....	59
Figura 2.21. Diagrama de fuerzas y momento flector Eje 2 poleas tipo largo -tren 12. ....	61
Figura 2.22'. Curvas de falla Se', Eje de 2 Poleas largo, AISI 4340.....	64
Figura 2.23. Curvas de Falla " Se real", Eje de 2 Poleas largo, AISI 4340.....	65
Figura 2.24. Diagrama de fuerzas y momento flector Eje 4 poleas -tren 12.....	67
Figura 2.25'. Curvas de falla Se', Eje de 4 Poleas largo, AISI 4340.....	69
Figura 2.26. Curvas de Falla " Se real", Eje de 4 poleas, AISI 4340 .....	70
Figura 2.27. Diagrama de fuerzas y momento flector Eje 6 poleas -tren 12.....	72
Figura 2.28'. Curvas de falla Se', Eje de 6 Poleas, AISI 4340 .....	74
Figura 2.29. Curvas de Falla " Se real", Eje de 6 poleas, AISI 4340 .....	75
Figura 2.30. Diagrama de fuerzas y momento flector Eje 12 poleas -tren 12.....	77
Figura 2.31'. Curvas de falla Se', Eje de 12 Poleas, AISI 4340 .....	79
Figura 2.32. Curvas de Falla " Se real", Eje de 6 poleas, AISI 4340 .....	80
Figura 2.33.Elementos a tracción.....	89
Figura 2.34. Esquema de la placa principal del soporte. ....	91
Figura 2.35. Esquema de placa de conexión principal. [Fuente: Propia].....	92
Figura 2.36.Esquema de placa de izaje. ....	93

Figura 2.37. Soldadura de la placa de Izaje. ....	96
Figura 2.38. Esquema de soldadura de la placa de conexión de la viga principal	98
Figura 2.39. Esquema de soldadura de la placa de conexión de la viga secundaria. .....	99
Figura 2.40. Antidescarrilador. ....	101
Figura 2.41. Polea .....	108
Figura 2.42.Tapa Polea .....	109
Figura 2.43. Placa par de poleas.....	109
Figura 2.44. Placa de conexión-4 poleas .....	110
Figura 2.45. Bocines.....	111
Figura 2.46.Eje tipo 1. ....	111
Figura 2.47. Eje Tipo 2. ....	112
Figura 2.48. Antidescarrilador. ....	112
Figura 2.49. Chapa guía del cable. ....	113
Figura 2.50.Topes Anti-rotación. ....	114
Figura 2.51. Viga principal.....	115
Figura 2.52. Placas especiales.....	115
Figura 2.53. Soporte.....	116
Figura 2.54. Placa de Izaje.....	117
Figura 2.55. Vigas secundarias. ....	117
Figura 2.56. Placas del tren Mixto. ....	118
Figura 2.57. Soporte tren mixto. ....	119
Figura 2.58. Placas retenedoras. ....	119
Figura 2.59. Selección del Modulo .....	130
Figura 2.60. Anclaje de Geometría.....	130
Figura 2.61. Selección del material .....	130

Figura 2.62. Primera malla generada. ....	131
Figura 2.63. Ortogonalidad de la primera malla .....	131
Figura 2.64. Ortogonalidad malla final.....	132
Figura 2.65. Malla Final.....	132
Figura 2.66. Cargas y soportes .....	133
Figura 2.67. Deformación Total .....	133
Figura 2.68. Convergencia de Esfuerzos equivalentes de VM .....	134
Figura 2.69. Esfuerzos equivalentes VM, eje principal para 12 poleas .....	135
Figura 2.70. Curva de falla a fatiga de Goodman y fluctuación de esfuerzo .....	135
Figura 2.71. Factor de seguridad a fatiga según Goodman del eje principal.....	136
Figura 2.72. Curva de falla a fatiga de Soderberg y Fluctuación de esfuerzo. ....	136
Figura 2.73. Factor de seguridad de Soderberg para el eje principal .....	137
Figura 3.1.Resultados -Eje 1 Polea (Deformación total) .....	141
Figura 3.2.Resultados -Eje 1 Polea (Esfuerzo equivalente) .....	141
Figura 3.3. Resultado Eje 1 Polea (Fs).....	142
Figura 3.4. Resultados Eje 2 poleas tipo 2 (Deformación total).....	142
Figura 3.5.Resultados -Eje 2 Poleas largo (Esfuerzo equivalente) .....	143
Figura 3.6. Resultados-Eje 2 Poleas tipo 2 (Fs) .....	143
Figura 3.7. Resultado Eje 2 Poleas tipo 1 (Deformación total) .....	144
Figura 3.8.Resultados -Eje 2 Poleas (Esfuerzo equivalente) .....	144
Figura 3.9. Resultado Eje 2 Poleas tipo 1 (Fs) .....	145
Figura 3.10. Resultados-Eje 4 poleas (Deformación total) .....	145
Figura 3.11. Resultados-Eje 4 poleas (Esfuerzos equivalentes) .....	146
Figura 3.12. Resultados- Eje 4 poleas (Fs) .....	146
Figura 3.13. Resultado- Eje 6 Poleas (Deformación total).....	147
Figura 3.14. Resultado- Eje 6 Poleas (Esfuerzo equivalente) .....	147

Figura 3.15. Resultado- Eje 6 poleas (Fs).....	148
Figura 3.16. Resultado-Eje 12 Poleas (Deformación total).....	148
Figura 3.17. Resultado-Eje 12 Poleas (Esfuerzos equivalentes).....	149
Figura 3.18. Resultado- Eje 12 Poleas (Fs).....	149
Figura 3.19. Resultado- Placa de conexión (Deformación total) .....	150
Figura 3.20. Resultado-Placa de conexión (Fs) .....	150

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones Mínimas. ....	17
Tabla 2. Alternativas para las poleas. ....	19
Tabla 3 Matriz de Criterios de ponderación.....	21
Tabla 4. Evaluación de las alternativas de diseño en base al criterio de mantenimiento.....	21
Tabla 5. Evaluación de las alternativas de diseño en base al criterio de producción nacional.....	22
Tabla 6. Evaluación de las alternativas de diseño en base al criterio de costos. .	22
Tabla 7. Evaluación de las alternativas de diseño en base al criterio de seguridad. ....	22
Tabla 8. Matriz de conclusiones. ....	23
Tabla 9. Datos técnicos Línea norte.....	25
Tabla 10. Datos Iniciales sobre la lía Ofelia-Roldós.....	26
Tabla 11. Combinaciones de cargas.....	30
Tabla 12. Determinación de cargas para cada piona. ....	31
Tabla 13. Reacciones en las pilonas según la combinación crítica.....	34
Tabla 14. Ángulos de corrección para cada piona (rad) .....	36
Tabla 15. Relación de diámetros .....	37
Tabla 16. Peso estructural para 1 eje.....	49
Tabla 17. Peso estructural para 1 eje de 2 poleas .....	55
Tabla 18. Peso estructural para 1 eje de 2 poleas-tipo largo .....	60
Tabla 19. Peso estructural para 1 eje de 4 poleas-Tren de 12 poleas .....	66
Tabla 20. Peso estructural para 1 eje de 6 poleas-Tren de 12 poleas .....	71
Tabla 21. Peso estructural para 1 eje de 12 poleas-Tren de 12 poleas .....	76
Tabla 22. Valores “FI” para rodamientos de rodillos.....	83

Tabla 23. Valores "Fn" para rodamientos de rodillos. ....	84
Tabla 24. Procesos de fabricación y proveedores de servicio.....	106
Tabla 25. Proveedores de Materia prima .....	107
Tabla 26. Descripción polea .....	108
Tabla 27. Descripción tapa polea .....	109
Tabla 28. Descripción placa par de poleas.....	110
Tabla 29. Descripción placa 4 poleas.....	110
Tabla 30. Descripción bocines .....	111
Tabla 31. Descripción ejes tipo 1 .....	112
Tabla 32. Descripción ejes tipo 2 .....	112
Tabla 33. Descripción antidescarrilador .....	113
Tabla 34. Descripción chapa guía de cable.....	113
Tabla 35. Descripción tope anti-rotación .....	114
Tabla 36. Descripción vigas principales .....	115
Tabla 37. Descripción placas especiales.....	116
Tabla 38. Descripción soporte.....	116
Tabla 39. Descripción izaje .....	117
Tabla 40. Descripción vigas secundarias .....	118
Tabla 41. Descripción placas tren mixto.....	118
Tabla 42. Descripción soporte tren mixto .....	119
Tabla 43. Descripción placas retenedoras .....	120
Tabla 44. Análisis de precio unitario del suministro, fabricación y ensamble de tren de 8 poleas a compresión. ....	122
Tabla 45. Análisis de precio unitario del suministro, fabricación y ensamble de tren de 10 poleas a compresión. ....	123

Tabla 46. Análisis de precio unitario del suministro, fabricación y ensamble de tren de 12 poleas a compresión. ....	124
Tabla 47. Análisis de precio unitario del suministro, fabricación y ensamble de tren de 8 poleas a tracción. ....	125
Tabla 48. Análisis de precio unitario del suministro, fabricación y ensamble de tren de 10 poleas a tracción. ....	126
Tabla 49. Análisis de precio unitario del suministro, fabricación y ensamble de tren de 12 poleas a tracción. ....	127
Tabla 50. Análisis de precio unitario del suministro, fabricación y ensamble de tren mixto de poleas. ....	128
Tabla 51. Precio unitario de los mecanismos del proyecto.....	129
Tabla 52. Resultados, Tren de 12 Poleas. ....	138
Tabla 53. Resultados, Tren de 10 Poleas ....	139
Tabla 54. Resultados, Tren de 8 Poleas ....	140
Tabla 55. Resumen de los resultados obtenidos en ANSYS.....	151

## RESUMEN

El presente documento contiene el estudio ingenieril del mecanismo de trenes de poleas o balancines para la línea Ofelia – Roldós, del proyecto de movilidad “Quito Cables”, el cual consiste en el transporte público masivo por medio de un sistema teleférico; una solución a la problemática de transporte de pasajeros de la ciudad de Quito. Se definen alternativas de diseño en base a las facilidades similares existentes en la infraestructura local; con la evaluación y determinación de la opción apropiada, se presenta el dimensionamiento del mecanismo fundamentado en las teorías de diseño mecánico y estructural. La utilización del método de elementos finitos mediante diferentes herramientas computacionales ha permitido validar el diseño propuesto. Los procesos con los que cuenta la industria nacional para provisión de materia prima y manufactura de los elementos que componen el mecanismo, incluido el costo para la obtención del mecanismo terminado, se encuentran dentro del presente estudio. Además, los distintos planos de conjunto, subconjunto y de taller de los elementos críticos del sistema, están incluidos dentro de este documento. Con todo este estudio, se ha logrado determinar que la industria ecuatoriana tiene la capacidad de fabricar este sistema, que cumple con los requerimientos o especificaciones técnicas mínimas para su respectiva operación, basado en lo que enuncian las respectivas normas relacionadas a estos sistemas de transporte.

**Palabras clave:** Trenes de poleas, teleférico, elementos finitos, esfuerzo admisible, esfuerzo de trabajo, trazado, cable.

## **ABSTRACT**

This document contains the engineering study of the pulley trains mechanism for the Ofelia - Roldos line, of the mobility project "Quito Cables", which consists in massive public transportation through a cable system; a solution to the problem of passenger's transport in Quito city. Design alternatives are defined based on similar facilities in Ecuadorian infrastructure; the evaluation and determination of the appropriate option, has let dimension the mechanism based on mechanical and structural design. The use of the finite element method (FEM), through different computational tools, has allowed the proposed design to be validated. The processes that the national industry has for the provision of raw material and manufacturing of the elements that make up the mechanism, including the cost to obtain the finished mechanism, are within the present study. In addition, the assembly, subset and workshop plan of the critical elements of the system are included in this document. Based on this study, it has been possible to determine that the Ecuadorian industry has the capacity to manufacture this system, which meets the minimum technical requirements or specifications for its respective operation, based on what the respective standards, related to these transportation systems, state.

**Keywords:** Pulley trains, ropeway system, finite elements, allowable stress, stress, layout, cable.

# **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE TRENES DE POLEAS PARA LAS PILONAS DEL SISTEMA TELEFÉRICO PROYECTO QUITO CABLES**

## **INTRODUCCIÓN.**

En la actualidad, el Distrito Metropolitano de Quito presenta problemas en cuanto a movilidad, debido al congestionamiento vehicular en horas pico. Debido a eso el Ilustre Municipio de Quito junto a la Secretaria de Movilidad, presentan una alternativa a la problemática del transporte de pasajeros en la ciudad, el proyecto Quito Cables, un sistema de transporte público masivo por teleféricos. Uno de los mecanismos primordiales inmerso en este proyecto es los “trenes de poleas”; la importancia de este sistema se debe a que de estos depende el guiado y soporte del cable que transporta a las cabinas. Este proyecto de titulación presenta el diseño del mecanismo trenes de poleas, aplicando conceptos relevantes de ingeniería, diseño estructural y mecánico.

La participación nacional es de gran importancia en la industria y en los proyectos de infraestructura pública, ya que se debe dar mayor protagonismo a los proveedores de materia prima y de servicios ecuatorianos. Es por este motivo, que el presente proyecto ha generado una solución con un alto porcentaje de participación ecuatoriana en la producción del sistema de trenes de poleas.

El presente trabajo de titulación está desarrollado bajo una estructura que determina la ingeniería del sistema, desagregación de la tecnología involucrada para el desarrollo del producto y los costos de producción.

Se ha generado una solución que ha cumplido con los objetivos definidos inicialmente, con lo cual se ha logrado determinar que la industria ecuatoriana tiene la capacidad de proveer la materia prima, productos y servicios, los mismos que cumplen con los requisitos o especificaciones técnicas mínimas para la entrada en operación del mecanismo diseñado.

En el capítulo 1, se encuentran descritos los sistemas de transporte por cable en sus principales clasificaciones, junto a la descripción de los sistemas que componen un teleférico. Además, incluye la descripción del proyecto de teleféricos para el transporte público masivo en la ciudad, "Quito cables".

El capítulo 2 cuenta dentro de su estructura con la determinación de las cargas de trabajo que afectan al sistema, el diseño conceptual del mecanismo, el dimensionamiento de los principales componentes del sistema, la utilización del método de elementos finitos para la simulación de los elementos críticos del mecanismo, la desagregación tecnológica del producto final y los costos que implica la construcción de los distintos mecanismos diseñados.

Dentro del capítulo 3 se encuentra la discusión de resultados basados en los distintos modelos matemáticos utilizados para el dimensionamiento del mecanismo y lo obtenido mediante el método de elementos finitos utilizando el software ANSYS.

Por último, el capítulo 4 recoge a las conclusiones y recomendaciones del presente estudio, tomando en cuenta los objetivos propuestos inicialmente y, los resultados obtenidos al haber culminado el presente proyecto.

## **Objetivo general.**

- Diseñar y simular los trenes de poleas para las pilonas del sistema teleférico proyecto quito cables.

## **Objetivos específicos.**

- Identificar los requerimientos de servicio de los trenes de poleas a lo largo del trazado.
- Determinar las magnitudes de carga generadas por el cable y los vehículos en cada una de las pilonas.
- Definir la geometría del mecanismo, asegurando un óptimo funcionamiento en relación con los elementos del sistema de transporte por cable.
- Diseñar las juntas que anclan el mecanismo a las pilonas.
- Validar mediante simulación el diseño propuesto.
- Generar los planos necesarios, los cuales brindaran la información suficiente para la fabricación del mecanismo.
- Desarrollar un estudio de desagregación tecnológica del mecanismo, con lo cual se buscará la fabricación del mecanismo en la industria Nacional.
- Desarrollar la ingeniería de costos en proceso de fabricación y obtención del mecanismo.

# 1. MARCO TEÓRICO.

## 1.1. Sistemas de transporte por cable.

Los teleféricos son una alternativa de transporte, la cual puede ser terrestre o aérea, que se fundamenta en el movimiento provocado por la tensión de un cable, logrando realizar el avance de distintos vehículos hacia las estaciones de transferencia de pasajeros.

Los teleféricos de transporte terrestre son conocidos como funiculares, “Figura 1.1”, los cuales pueden semejarse a un tipo de ferrocarril el cual va montado sobre rieles, en una especie de ascensor con inclinación; los vehículos se encuentran enganchados a un cable de acero sobre la vía; este cable es el que transporta a los vehículos por medio de la moción transmitida por un motor a un volante de gran magnitud.



Figura 1.1. Funicular.  
[Fuente: [1]]

Dentro de los teleféricos de transporte aéreo, se encuentran cabinas de transporte y telesillas, “Figura 1.2”, las cuales se encuentran sujetas al cable tractor-portador, el cual se mueve debido a la moción transmitida por un motor acoplado a un volante de gran magnitud, a través de un reductor de velocidad. En este caso, el cable se encuentra apoyado sobre poleas o rodillos, las cuales se encuentran implantadas en cada una de las pilonas o torres constituyentes del trazado.



Figura 1.2. Cabina y telesilla.  
Fuente: [2]

Este medio de transporte es mayormente utilizado para distintas zonas con prominentes diferencias de altura y lugares de difícil acceso, tales como montañas, quebradas, valles y ríos, donde que el transporte por medio de carretera es realmente complicado. Además, es un medio de transporte amigable con el medio ambiente y eficiente, ya que la transmisión del movimiento se la da a partir de motores eléctricos, libres de emisiones.

Existen pocas desventajas con respecto a la utilización de estos sistemas, entre las cuales se destaca que la capacidad para transportar gente es limitada por vehículo.

## **1.2. Elementos de los Sistemas de transporte por teleféricos.**

Los teleféricos de ciudad actualmente han tenido cabida en varias obras públicas de distintos países, por ser un medio de transporte seguro, eco-amigable y una solución al problema de movilidad, ya que atraviesan metrópolis donde la densidad poblacional es exorbitante, lo cual provoca congestión en el momento de movilizarse de un lugar a otro.

Los teleféricos cuentan con varios elementos y sistemas que cumplen una determinada función para el correcto funcionamiento del teleférico.

Entre los sistemas y elementos encontramos:

### **1.2.1. Estaciones.**

Las estaciones de transferencia son edificaciones donde que se realiza el embarque y desembarque de pasajeros y, además, son las facilidades donde se

encuentran operativos los distintos sistemas electromecánicos, como son: motores, frenos, paneles de control, volantes, tensores, etc.

Las estaciones no son estandarizadas, más que por sus componentes, debido a que deben mimetizarse con la naturaleza y el entorno donde se van a encontrar; depende mucho el sitio donde están ubicadas para dar ciertas características que las diferencian de las demás estaciones, en otras palabras, cada estación es única, ver “Figura1.3”.



Figura 1.3. Estación de transferencia Libertador, Bolivia.  
Fuente: [2]

### 1.2.2. Sistema motriz.

El sistema motriz, “Figura 1.4” es el encargado de transmitir movimiento al cable, al cual están sujetos los vehículos o cabinas; este se encuentra acoplado al volante, a través de un reductor, ubicado en las estaciones de transferencia del punto de partida o en el punto de llegada dependiendo de las necesidades del proyecto y sus especificaciones. Este sistema cuenta con cinco componentes principales, los cuales son: motor principal, motores alternativos de emergencia, variadores de velocidad, frenos de servicio y frenos de emergencia.



Figura 1.4. Sistema motriz teleférico Zugspitze, Alemania.  
Fuente: [3]

### 1.2.3. Línea de transporte.

La línea de transporte está conformada por pilonas o torres, balancines o poleas y el cable.

Las pilonas, “Figura 1.5”, son las torres donde va apoyado el cable, que a su vez transporta a la cabina; estas están diseñadas de tal manera que sostengan las cabinas con un determinado espaciado y con un factor de seguridad entre 3,5 y 20 según la norma [4].

Otros elementos importantes que componen el sistema teleférico son los balancines o trenes de poleas, puesto que estos elementos estarán sometidos a diferentes cargas y sollicitaciones mecánicas por lo que es esencial que sean diseñados bajo un minucioso análisis, la importancia de este sistema se debe a que de este depende el guiado y soporte del cable.



Figura 1.5. Pilonas o torres.  
Fuente: [1]

El cable de acero, “Figura 1.6”, es el elemento que encarga de transportar a los vehículos dentro del trazado, este trabaja mayormente a fatiga. Además, su fabricación es sumamente compleja, ya que se encuentra constituido por torones; los torones de un cable de acero se encuentran constituidos por cierta cantidad de alambres que se enrollan de forma helicoidal alrededor de un núcleo o alma.

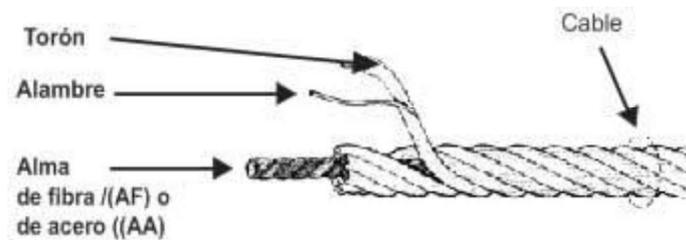


Figura 1.6. Esquema del cable tractor-portador.  
Fuente: [5]

#### 1.2.4. Sistema de control del teleférico.

Como su nombre lo indica este sistema, “Figura1.7” se encarga de controlar, regular y supervisar la operación de los teleféricos; esto permite obtener datos en tiempo real de los distintos componentes para asegurar la calidad y brindar confiabilidad al momento de transportar personas, con el fin de brindar seguridad pública.



Figura 1.7. Centro de control y operaciones del teleférico Funchal-Monte, Portugal.  
Fuente: [2]

### 1.2.5. Cabinas o vehículos.

La Cabina es donde están situados los pasajeros, su diseño está pensado en la comodidad y confort de estos. Además, debe tener un diseño aerodinámico que permita deslizar el vehículo con mayor facilidad a través del aire exterior, o en caso de que se produzcan vientos extremos, sus superficies reduzcan la incidencia de este para evitar riesgos por movimientos bruscos.

El vehículo, “Figura 1.8” está sujeto al cable tractor-portador por medio de una pinza desembragable; en la actualidad existen 2 tipos de pinzas: la fija, la cual se ha utilizado durante varias décadas atrás y se conoce que es muy segura y eficaz, y la segunda opción es del tipo desembragable, la cual tiene la capacidad de abrirse cerrarse para encajar o soltar la cabina en una estación.



Figura 1.8. Vehículo o cabina.  
Fuente: [6]

### **1.3. Sistemas de trenes de Poleas en teleféricos.**

Los trenes de poleas son los encargados de soportar y guiar el cable que transmite el movimiento a las cabinas. Están compuestos por distintos elementos que cumplen una función específica, entre los cuales tenemos vigas, poleas, ejes, rodamientos, bocines y pernos. El diseño y selección de estos elementos debe estar enfocado en la seguridad de los pasajeros, por lo que los factores de seguridad no deben ser menores a 3.5 [4].

Las poleas son los componentes sobre los cuales se asienta el cable en movimiento; al tener esta interacción con este elemento son los más propensos a desgastarse por lo que es importante, que trabajen conjuntamente con recubrimientos compuestos de materiales que, además de evitar el desgaste de este elemento y facilitan el mantenimiento del sistema.

El mantenimiento de este tipo de mecanismo debe ser de acuerdo a las especificaciones de cada diseñador, dependiendo los materiales utilizados para su construcción, es así el caso que puede tener mantenimiento trimestral, semestral o en ciertos casos anual.

### **1.4. Tipología de trenes de poleas.**

Existen tres tipologías, y la selección del sistema a utilizar depende del estado de carga bajo la cual opera la misma; de esta forma se tienen trenes de poleas bajo solicitaciones a tracción, compresión y mixtas (tracción-compresión).

Cada tipología es resultado del análisis de la sollicitación mecánica de la carga en base a topografía descrita por el trazado, en cada tramo del sistema; esto significa que dependiendo en el tramo que se encuentre las pilonas, estos pueden tomar distintos estados de carga, debido a la geografía o desnivel que se encuentra una piona con respecto a la otra. Existen casos en los cuales pueden estar presentes la sollicitación mecánica de tracción y compresión, debido a la ubicación de las cabinas en cierto tramo, por lo cual es recomendable montar un tren de poleas mixto.

A continuación, se detalla de mejor manera el mecanismo y funcionamiento de los distintos tipos de trenes de poleas.

#### 1.4.1. Trenes de Poleas a tracción.

Las tensiones o cargas ejercidas, “Figura 1.9”, por el cable en este tipo de trenes de poleas, están en el mismo sentido que la gravedad, por lo que ejercen presión en el sentido vertical con dirección hacia el suelo.

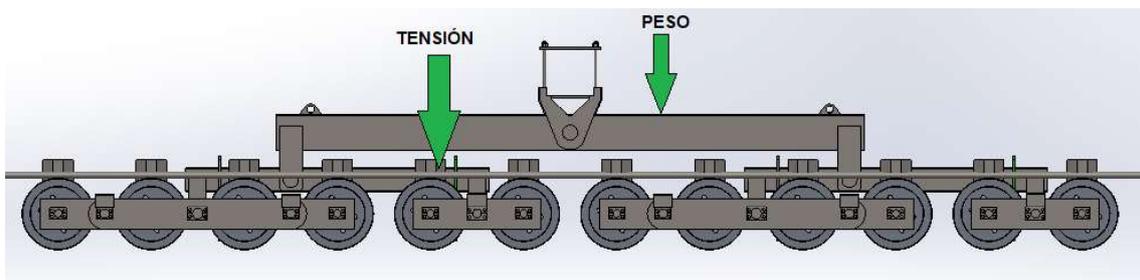


Figura 1.9. Esquema tren de poleas a tracción.  
[Fuente: Propia]

#### 1.4.2. Trenes de Poleas a compresión.

En este caso, las tensiones producidas en las poleas de este tren estarán en sentido contrario a la gravedad,” Figura 1.10”, lo que significa que el cable estará comprimiendo las poleas en sentido vertical hacia arriba.

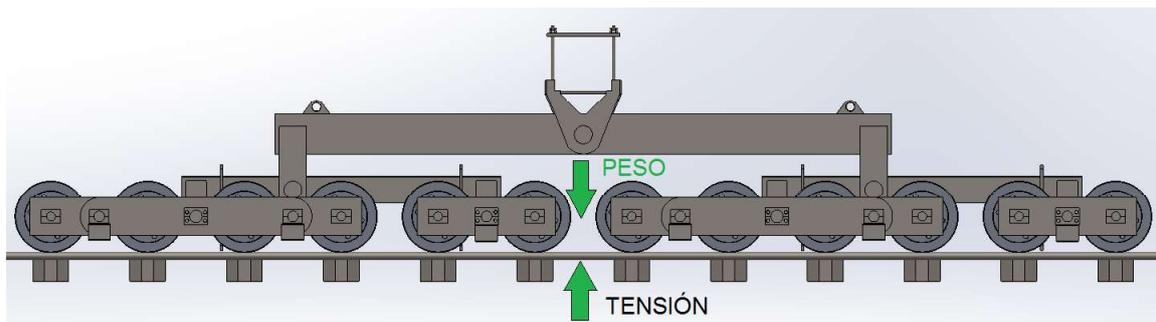


Figura 1.10. Esquema tren de poleas a compresión.  
[Fuente: Propia]

#### 1.4.3. Trenes de Poleas a Tracción y compresión.

Debido a la topografía existen trenes de poleas que pueden estar trabajando bajo sollicitaciones mecánicas a tracción o compresión, esto depende de la carga ejercida por el cable sobre las poleas, ver “Figura 1.11”, por lo que para evitar

ambigüedades se estipula un tren que pueda manejar ambas cargas, teniendo en cuenta balancines en la parte superior e inferior.

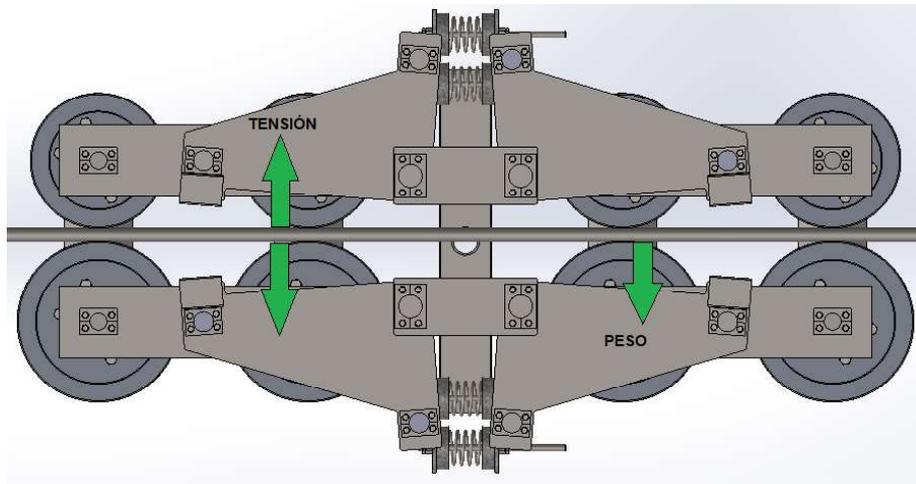


Figura 1.11. Esquema tren de poleas mixto.  
[Fuente: Propia]

### 1.5. Cargas a las que se encuentran sometidos los trenes de poleas.

Los sistemas se encuentran sometidos a diferentes cargas las cuales están clasificadas, dependiendo de ciertos parámetros.

**Carga Muerta:** Se encuentra constituida por los pesos de todos los elementos del sistema o estructura que actúan permanente sobre sí misma. En este caso, se refiere a elementos como vigas, poleas, placas, ejes, bocines y todo elemento integrado de manera permanente en el sistema. [7]

**Carga Viva:** es el peso o la carga que ejerce de forma dinámica que en un determinado momento está, en este caso sería la carga que ejercen las personas dentro de la cabina, sabiendo que las cabinas están diseñadas con el objetivo de transportar a 10 personas por cada una de ellas, y tomando un peso promedio de 80 kg por persona, [4], se tiene un total de 800 kg de carga viva por cada una de las cabinas.

Carga de viento: esta carga es esencialmente una de las más críticas debido a que es impredecible, por lo cual al momento de su diseño no puede ser tomada a la ligera y se prefiere hacer cabinas con diseño aerodinámico que faciliten el flujo de aire exterior alrededor de la cabina sin embargo es de suma importancia tomarla en cuenta para obtener resultados reales.

Carga de sismo: Se conoce como carga sísmica a la acción provocada por un movimiento telúrico o sismo sobre una estructura; esta es transmitida hacia una estructura por medio del suelo, o en el caso de las costas por el contacto de las olas de mar con el sistema.

## **1.6. Generalidades del proyecto Quito-Cables.**

En la actualidad la ciudad de Quito presenta problemas en cuanto a movilidad, debido a que el parque automotor de la ciudad crece constantemente generando congestión vehicular y, el sistema de transporte público se colma en horas pico. En el año 2017, la ciudad capital registró en sus datos de matriculación vehicular un total de 432000 unidades dentro del parque automotor [8], lo cual pone a la ciudad al borde de la saturación vehicular.

Varias alternativas han surgido para resolver esta problemática; una de ellas es el contar con un sistema teleférico de transporte masivo público, que en los últimos diez años ha sido implementado en ciudades como Rio de Janeiro (Brasil), Portland (EE. UU.), Caracas (Venezuela), Oregón (EE. UU.), Medellín (Colombia), La Paz (Bolivia), entre [9]. En el caso del teleférico de Medellín, ha sido visible el gran aporte a zonas marginadas, mejorando la calidad de vida de los habitantes de los sectores involucrados.

Lo que busca esta alternativa en la ciudad de Quito es beneficiar a habitantes de los sectores Colinas del Norte, Mariscal, Ofelia y Roldós, ver “Figura 1.12”, generando una alternativa de transporte público en el eje transversal de la ciudad e integrándolo con las opciones de transporte del eje longitudinal, tales como alimentadores, biarticulados e incluso con el Metro de Quito.

Esta alternativa de transporte brinda una solución a la movilidad dentro de la ciudad, la cual consiste en transportar personas por un recorrido de 3,7 kilómetros de distancia, entre los sectores de la Ofelia y la Roldós, con un tiempo de viaje estimado de 13 minutos para cumplir el mencionado trayecto, beneficiando de esta manera a 200000 habitantes de 40 barrios, directa e indirectamente. Además, este sistema cuenta con dos estaciones de transferencia adicionales las cuales se localizarán en las zonas de la Mariscal y Colinas del Norte.



Figura 1.12. Trazado de la línea Ofelia-Roldós.

Fuente: [10]

La velocidad de la cabina es de 5m/s a lo largo del trazado y de 0,5 m/s, al momento de ingresar a las estaciones.

## **2. METODOLOGÍA.**

### **2.1. Definición del producto.**

El mecanismo de trenes de poleas en sí es el encargado de brindar soporte y guía al cable tractor-portador en los sistemas de transporte por cable, facilitar la movilidad del cable en los teleféricos, para determinar las características de nuestro producto y determinar especificaciones mínimas, se usó la casa de la calidad como herramienta para traducir requerimientos del cliente en aspectos técnicos del mecanismo.

El diseño de los mecanismos de sistemas teleféricos, debe estar provisto de alta seguridad, facilidad de mantenimiento y optimización de la vida útil de sus elementos, son conceptos que nos permiten definir las cualidades de un producto, estos conceptos deben estar presentes en las especificaciones técnicas obtenidas a partir de la casa de la calidad.

Con las especificaciones obtenidas, se describe la funcionalidad del sistema mediante diagramas de función, que nos permitieron generar alternativas de diseño, y en base a una matriz de criterios ponderados, se analizó las alternativas.

#### **2.1.1. Casa de la calidad**

La casa de la calidad es un arreglo de datos como lo muestra la “Figura 2.1”, que permite ordenar requerimientos del cliente y concatenar con especificaciones técnicas alrededor de una matriz, donde se generan relaciones entre cada uno de los requerimientos. Además, se evalúa opciones de la competencia para satisfacer los requerimientos y los criterios técnicos descritos en la matriz mediante correlaciones de relevancia y valores de importancia.

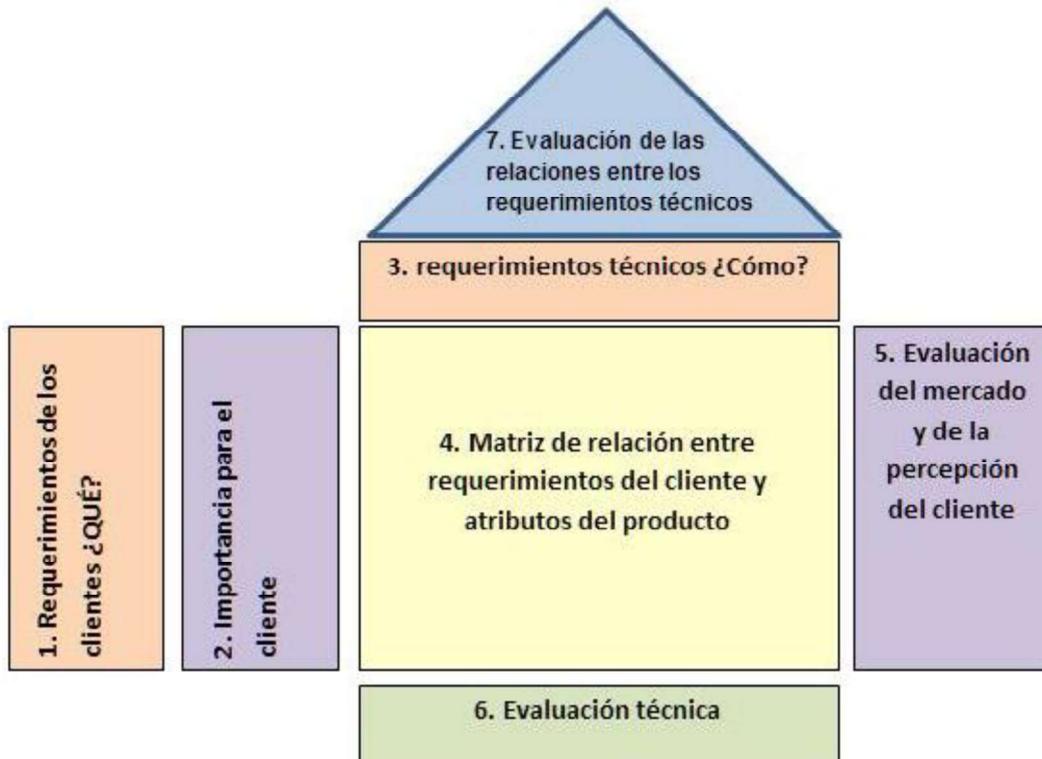


Figura 2.1. Casa de la calidad descripción  
[Fuente: [11]]

Estos requerimientos son descritos en la casa de la calidad, e interpretados en forma de parámetros técnicos, de esta manera se obtuvo un tipo de especificaciones mínimas que debe cumplir.

(ANEXO 1).

### 2.1.2. Especificaciones para el mecanismo.

Los parámetros mínimos o especificaciones mínimas según su relevancia se los obtuvo a partir de la casa de la calidad, se los puede observar en la “Tabla 1”, los factores de seguridad están de acuerdo con las normas AENOR, descritas en metodología.

Tabla 1. Especificaciones Mínimas.

<b>Criterios de Diseño iniciales.</b>	<b>Especificaciones</b>
Factores de seguridad	3,5-20
Producción Nacional	Fabricación en empresa ecuatorianas
Requerimientos de Mantenimiento	Bajo
Costo	Relativamente bajo
Modular	SI
Conexiones	Necesarias
Placas de Izaje	SI
Recubrimiento	SI

[Fuente: Propia]

## **2.2. Diseño Conceptual.**

El diseño conceptual es la metodología que se utiliza para poder sintetizar problemas y así poder llegar a una óptima solución que cubra las especificaciones y objetivos planteados; existen diversas metodologías que permiten realizar este tipo de diseño, en nuestro trabajo se han utilizado diagramas de funciones y matriz de criterios ponderados, de esa manera se analizó el funcionamiento del tren de poleas y se escogió la mejor alternativa.

### **2.2.1. Diagramas de funciones.**

Los diagramas de funcionalidad son herramientas que permiten definir soluciones a una problemática a partir de una tarea o función a cumplir, [12]. El diseño funcional ha sido desarrollado en base a un diagrama de varios niveles, el mismo que describe el tipo de servicio que realiza el mecanismo de trenes de poleas.

Tal como se muestra en la “Figura 2.2”, la cual describe un primer nivel, este se encarga de dar a conocer la funcionalidad global que cumple un producto, es por eso por lo que en este caso se toma en cuenta a la función principal del mecanismo, la cual es brindar soporte al cable tractor- portador y guiarlo. Además, se detallan las distintas variables de entrada y de salida para este análisis.

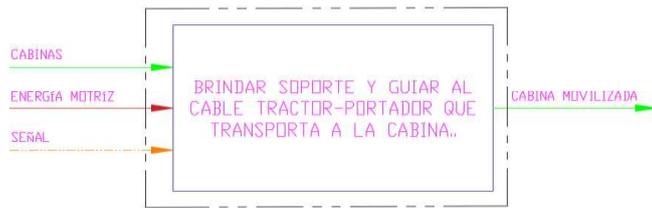


Figura 2.2. Diagrama de funcionalidad, primer nivel  
[Fuente: Propia]

La “Figura 2.3”, describe un segundo nivel en el cual se dan a conocer los servicios o funciones generales que realiza un producto; en este caso se toma en cuenta a permitir el paso de la cabina de manera suave al momento de entrar al mecanismo.

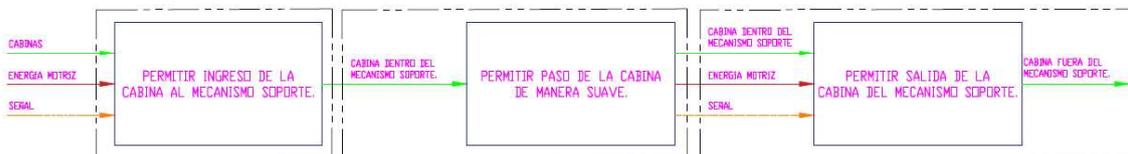


Figura 2.3. Diagrama de funcionalidad de segundo nivel.  
[Fuente: Propia]

Como se observa en la “Figura 2.4”, para conocer funciones fundamentales que cumplirá el mecanismo, se ha descrito un tercer nivel, de la misma manera mencionando las distintas variables de entrada y de salida que afectan al sistema.

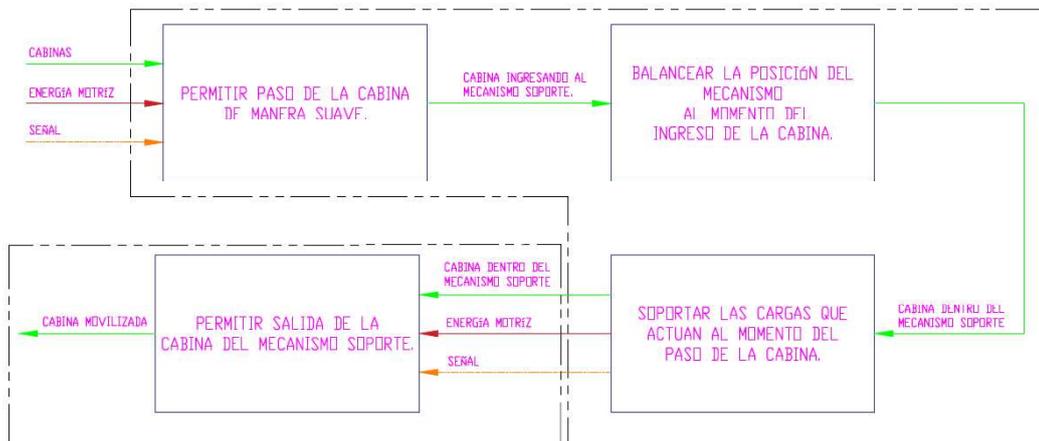


Figura 2.4. Diagrama de funcionalidad de tercer nivel.  
[Fuente: Propia]

Las funciones descritas en estos diagramas están tomadas en cuenta en el momento del modelamiento y el diseño.

### 2.2.2. Matriz de criterios ponderados.

De manera similar, la matriz de criterios ponderados consiste en priorizar y clasificar las alternativas de solución dadas a través de la evaluación de los criterios dados al ser ordenados en una matriz cuyas que contiene y los requisitos preestablecidos; la evaluación será dada por una ponderación que se da a cada requerimiento y posterior a ello se asigna cierta puntuación por cada criterio de solución, siendo la alternativa con mayor puntuación la más viable para realizar.

Para el caso del presente proyecto, se realizó la matriz de ponderación generando alternativas presentes en algunos proyectos de este tipo de infraestructura, a nivel local. Existen varios teleféricos dentro del país, donde que la principal diferencia son los materiales utilizados para la construcción del mecanismo; la más notable es el material con las que son manufacturadas las poleas, en el teleférico de Quito se encuentran poleas de duraluminio y en el caso de teleféricos turísticos más pequeños, las poleas son manufacturadas a partir de Duralón de alta resistencia; es por eso por lo que se han definido las siguientes alternativas para el respectivo análisis en la “Tabla 2”, descrita a continuación.

Tabla 2. Alternativas para las poleas.

Criterios de Diseño iniciales.	Alternativas de diseño		
	Alternativa 1 Poleas Duralón	Alternativa 2 Poleas de Aluminio	Alternativa 3 Poleas de Duraluminio
Elementos estructurales	Placas	Tubos Cuadrados	Perfil IPE/HBE
Poleas	Duralón	Aluminio	Duraluminio
Conexiones (Soldadas/Empernadas)	Empernadas	Mixtas	Empernadas
Recubrimiento	NO	SI	SI
Materiales nacionales	SI	SI	NO
Seguridad	Media	Alta	Alta
Mantenimiento	Alto	Bajo	Bajo
Costo	Bajo	Moderado	Alto

[Fuente: Propia]

La alternativa 1, “Figura 2.5”, tiene una estructura basada solo en placas y con conexiones emperradas. Además, sus poleas son de “Duralón”, lo cual permite que la este a un mayor alcance de la producción nacional en cuanto a estructura.

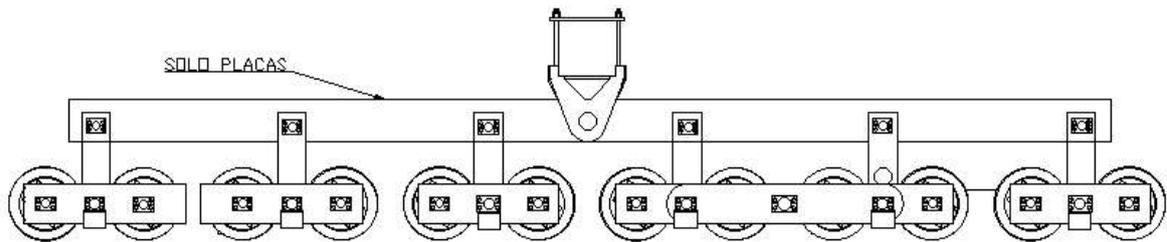


Figura 2.5. Alternativa 1.  
[Fuente: Propia]

La alternativa 2, está pensada para que la estructura sea a base de tubos rectangulares, poleas de aluminio y conexiones mixtas, facilitando el montaje y su mantenimiento. Además, cuentan con elementos anti-desvíos y placas de Izaje, como lo muestra la “Figura 2.6”.

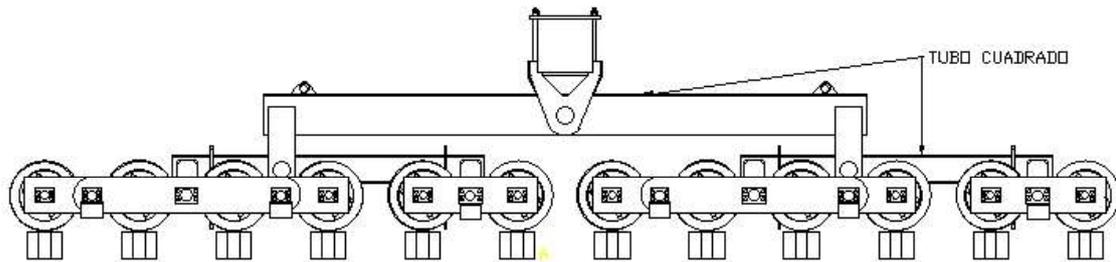


Figura 2.6. Alternativa 2.  
[Fuente: Propia]

La alternativa 3, consta con una estructura a base de perfiles HEB/HEA con placas soldadas que permite hacer las respectivas conexiones emperradas con el resto de la estructura, como lo muestra la “Figura 2.7”, cuenta con poleas de “Duraluminio”

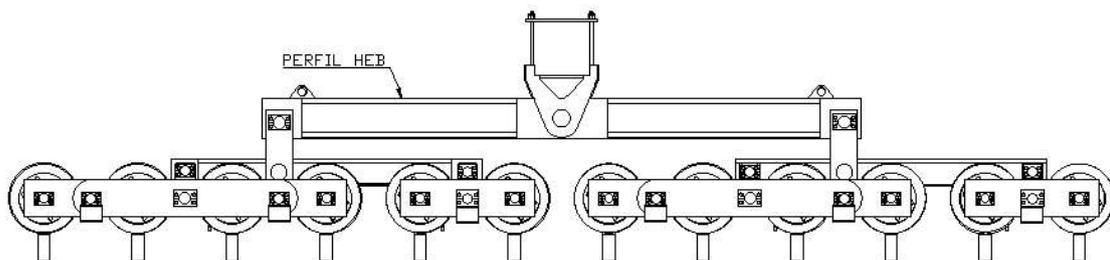


Figura 2.7. Alternativa 3.  
[Fuente: Propia]

Cada alternativa es diferente, básicamente en sus elementos principales como es la estructura, poleas y conexiones, en base a estas diferencias aumentan o disminuyen los criterios relevantes del sistema de trenes de poleas. Los criterios para la evaluación de alternativas han sido definidos en base a los aspectos más relevantes de este sistema de transporte y a los objetivos definidos para el presente estudio, es por eso por lo que los criterios de evaluación son mantenimiento, producción nacional, costos y seguridad, como se puede observar en la “Tabla 3”.

Tabla 3 Matriz de Criterios de ponderación.  
Seguridad > Producción nacional > Mantenimiento > Precio.

<b>CRITERIO</b>	Mantenimiento	Producción nacional	Precio	Seguridad	$\Sigma+1$	<b>POND.</b>
Mantenimiento		0	1	0	2	0,2
Producción nacional	1		1	0	3	0,3
Precio	0	0		0	1	0,1
Seguridad	1	1	1		4	0,4
<b>SUMA</b>					10	1

[Fuente: Propia]

Conociendo la relevancia que tienen los criterios definidos para la selección de una alternativa, se procedió a realizar la evaluación de las opciones de diseño en base a los criterios definidos previamente en las “Tablas; 4-5-6-7”.

Tabla 4. Evaluación de las alternativas de diseño en base al criterio de mantenimiento.  
Alternativa 2 = Alternativa 3 > Alternativa 1.

<b>MANTENIMIENTO</b>	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	<b>POND.</b>
Alternativa 1		0	0	1	0,166
Alternativa 2	1		0,5	2,5	0,416
Alternativa 3	1	0,5		2,5	0,416
<b>SUMA</b>				6	1

[Fuente: Propia]

Tabla 5. Evaluación de las alternativas de diseño en base al criterio de producción nacional.  
 Alternativa 1= Alternativa 2 > Alternativa 3.

<b>PRODUCCIÓN NACIONAL</b>	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	<b>POND.</b>
Alternativa 1		0,5	1	2,5	0,416
Alternativa 2	0,5		1	2,5	0,416
Alternativa 3	0	0		1	0,166
<b>SUMA</b>				6	1

[Fuente: Propia]

Tabla 6. Evaluación de las alternativas de diseño en base al criterio de costos.  
 Alternativa 1 > Alternativa 2 > Alternativa 3.

<b>COSTOS</b>	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	<b>POND.</b>
Alternativa 1		1	1	3	0,5
Alternativa 2	0		1	2	0,333
Alternativa 3	0	0		1	0,166
<b>SUMA</b>				6	1

[Fuente: Propia]

Tabla 7. Evaluación de las alternativas de diseño en base al criterio de seguridad.  
 Alternativa 3 = Alternativa 2 > Alternativa 1.

<b>SEGURIDAD</b>	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	<b>POND.</b>
Alternativa 1		0	0	1	0,166
Alternativa 2	1		0,5	2,5	0,416
Alternativa 3	1	0,5		2,5	0,416
<b>SUMA</b>				6	1

[Fuente: Propia]

Al haber evaluado cada uno de los criterios con respecto a las alternativas propuestas, se ha desarrollado una matriz de conclusión, “Tabla 8”, para la selección de una opción de diseño, dando como resultado la selección de la alternativa 2, basada en la fabricación de poleas a partir de fundiciones de aluminio cubiertas por un elastómero.

Tabla 8. Matriz de conclusiones.

<b>CONCLUSIÓN</b>	Mant.	P. Nacional	Costos	Seguridad	$\Sigma$	<b>PRIOR.</b>
Alternativa 1	0,166	0,416	0,5	0,166	1,25	<b>2</b>
Alternativa 2	0,416	0,416	0,333	0,416	1,583	<b>1</b>
Alternativa 3	0,416	0,166	0,166	0,416	1,166	<b>3</b>

[Fuente: Propia]

En base al análisis realizado mediante la matriz de criterios ponderados tomando en cuenta a los requerimientos más relevantes del presente proyecto, se ha determinado que la alternativa 2 es la que cumple con los criterios expuestos previamente.

### 2.3. Diseño de materialización.

En el momento de diseñar en acero se debe tener en cuenta que existe una elección que debe ser tomada antes de poder comenzar en cuanto al tipo de filosofía que se va a usar dentro del diseño, existen dos tipos actualmente; el método por última resistencia (LRFD) y el método por esfuerzo de trabajo (ASD). [12]

Diseño por esfuerzo de trabajo (ASD), es el cálculo del esfuerzo máximo permitido para un elemento estructural, supeditado a una carga de trabajo, este método compara las tensiones permisibles con las tensiones reales, este método se acomoda más a proyectos de ingeniería mecánica, utiliza factores de seguridad “FS” (Factor de seguridad). [12]

Diseño por última resistencia (LRFD), es el cual permite evaluar diferentes modos de comportamiento que comprometen la estabilidad de la estructura, este método compara la resistencia requerida con las fuerzas reales. [7]

El método “LRFD” se incorporó a finales del año 1986 con la primicia de que en las estructuras producía un factor de seguridad consistente, sin embargo, el método ASD es mucho más conservador, como se puede observar en la “Figura.2.8.” se ilustra los dos métodos de cálculo de capacidad en un diagrama común de carga vs desplazamiento para un acero suave.

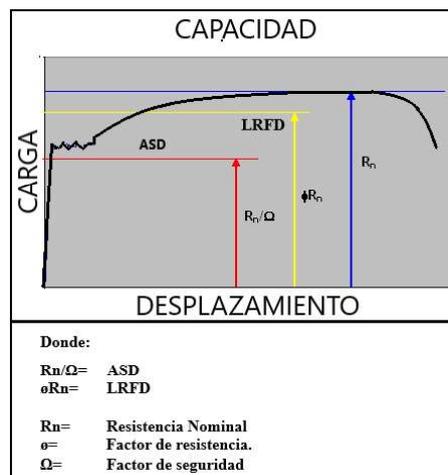


Figura 2.8. Carga vs Desplazamiento ACERO suave- Métodos de Diseño.  
[Fuente: Propia]

Por el método LRFD se obtienen estructuras más livianas, sin embargo, por el método “ASD” se obtienen estructuras más eficientes. [13]

Es recomendable usar el método LRFD para estructuras con muchas conexiones, debido a que la diferencia en peso será más abrupta entre estos dos métodos, sin embargo, para estructuras más eficientes es recomendable utilizar el método “ASD”.

Por lo tanto, para el proyecto a desarrollar la determinación de cargas y el diseño estarán bajo el método ASD, debido a que este método permite generar estructuras más eficientes y conservadoras.

### **2.3.1. Determinación y análisis de las cargas a las que estará sujeto el mecanismo.**

Se presentan los parámetros generales de la línea azul del proyecto quito cables Ofelia-Roldós en la “Tabla 9”.

Tabla 9. Datos técnicos Línea norte.

<b>Datos técnicos (LÍNEA NORTE: OFELIA-ROLDÓS)</b>	
Longitud total	3701,16 m
Desnivel entre estaciones	122,56 m
Capacidad Máxima del sistema	1764 pasajeros
Número de circuitos del cable	1
Número de estaciones intermedias.	2 (Mariscal-Colinas del norte)
Estación Motriz	Colinas del norte
Número de vehículos	132

[Fuente. Propia]

### **Parámetros Iniciales**

La línea norte, Ofelia-Roldós, está compuesta por 27 tramos, cada tramo debido a la topografía tiene diferente luz y diferente tipología las cabinas pueden estar a una distancia mínima de 54 m, dando como resultados la “Tabla 10”.

Los datos de la “Tabla 10” nos ayudaran para poder estipular la primera simulación en el programa de cálculo estructural SAP 2000, para formar el mallado, para las ubicaciones de cada una de las pilonas.

Tabla 10. Datos Iniciales sobre la lía Ofelia-Roldós.

Tramo	Pilonas	Qty cabinas (u)	Distancia entre pilonas (m)	Tipología
1	P1-P2	1	23,80	Compresión
2	P2-P3	3	138,20	Tracción
3	P3-P4	4	211,60	Tracción
4	P4-P5	4	249,10	Tracción
5	P5-P6	3	166,20	Tracción
6	P6-P7	2	85,50	Tracción
7	P7-P8	2	85,10	Tracción
8	P8-P9	1	65,40	Mixto
9	P9-P10	1	36,40	Compresión
10	P10-P11	1	73,80	Tracción
11	P11-P12	4	215	Tracción
12	P12-P13	3	184,20	Tracción
13	P13-P14	4	216,70	Tracción
14	P14-P15	5	231,70	Tracción
15	P15-P16	2	109,50	Tracción
16	P16-P17	4	237,10	Tracción
17	P17-P18	5	321,50	Mixto
18	P18-P19	1	69,10	Tracción
19	P19-P20	1	31,70	Compresión
20	p20-P21	1	61,80	Compresión
21	P21-P22	3	125,60	Mixto
22	P22-P23	2	132,30	Tracción
23	P23-P24	1	78,70	Tracción
24	P24-P25	1	70,10	Tracción
25	P25-P26	5	230,90	Tracción
26	P26-P27	3	148,20	Tracción
27	P27-P28	2	68	Compresión

[Fuente: Propia]

### 2.3.1.1. Combinaciones de carga (ASD). [13]

Datos de entrada

Peso de la cabina (kg) =  $P_c = 920$  (Kg)

Peso lineal del cable =  $P_{cb} = 12.40$  (Kg/m)

No de cabinas= $N$

Longitud del cable entre cabinas= $L_c$

Definición de Cargas

$D$ = Carga muerta

$L$ = Carga Viva

$E$ =Carga de sismo

$W$ =Carga de viento

$U$ =CARGA DE DISEÑO

$$U = D \quad \text{EC. ( 1)}$$

$$U = D + L \quad \text{EC. ( 2)}$$

$$U = D + \max(Lr, S, R) \quad \text{EC. ( 3)}$$

$$U = D + 0.75L + 0.75(0.6W) + 0.75 \max(S) \quad \text{EC. ( 4)}$$

$$U = D + 0.75L + 0.75(0.7E) + 0.75(S) \quad \text{EC. ( 5)}$$

$$U = 0.6D + 0.6W \quad \text{EC. ( 6)}$$

$$U = 0.6D + 0.7E \quad \text{EC. ( 7)}$$

### 2.3.1.2. Cálculo de cargas.

#### Carga Permanente (Muerta)

La carga permanente es el peso conjunto de la cabina, sumado el peso del cable.

$$\text{Peso Cabinas} = 920 \text{ kg}$$

$$\text{Peso del cable} = 12.40 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$\text{Número de Cabinas} = N$$

$$\text{Longitud del cable} = L_c = 0,05 * DT$$

$$\text{Distancia entre cabinas lineal} = DT$$

$$\text{Carga Muerta} = D = N * PC + L_c * P_{cb} \quad \text{EC. ( 8)}$$

#### Carga no Permanente (Viva)

El número de personas que ocuparan una cabina en su máxima capacidad, con el peso promedio por cada persona estipulado por la norma.

Donde:

$$\text{Peso x persona} = P_u = 80 \text{ kg}$$

$$\text{Capacidad de las cabinas} = C_p = 10 \text{ Personas}$$

$$\text{Carga Viva} = L = N * C_p * P_{personas} \quad \text{EC. ( 9)}$$

#### Carga Sísmica (E)

Por criterio de la ASD, la carga de sismo se considera como 1/3 de la carga permanente.

Donde:

$$\text{Carga Sismo} = E = 0.30 * D \quad \text{EC. ( 10)}$$

### Carga Viento (W)

Se calculó con la presión que ejerce el viento en el área mayor de cada cabina por cada tramo, para esto obtenemos un valor promedio de la velocidad del viento en la ciudad de Quito desde el 2015 hasta Julio 2019. [14].

Donde:

$$\text{Velocidad del Viento} = 9.4 \frac{\text{Km}}{\text{h}} = V_v, [14]$$

$$\text{Presión del viento} = P_v = \frac{1}{2} * d_a * V_v^2$$

$$\text{Densidad del aire} = d_a = 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Área de la cabina} = 4.4 \text{ m}^2$$

$$\text{Carga de viento} = W = N * P_v / A \quad \text{EC. ( 11)}$$

### Carga de granizo (S)

No aplica debido a la naturaleza de la estructura y el sistema.

#### 2.3.1.3. Ejemplo de cálculo.

Tramo: Pilon 17 – Pilon 18

$$N = 6$$

$$L_c = 337.60 \text{ m}$$

$$C_p = 10 \text{ Personas}$$

*Carga Muerta*

$$D = N * P_C + L_c * P_{cb}$$

$$D = 6 * 920 + 337.6 * 12.10$$

$$D = 9604.96 \text{ kg} = 96 \text{ kN}$$

### *Carga Viva*

$$L = N * Cp * P_{personas}$$

$$L = 6 * 10 * 80 \text{ kg}$$

$$L = 4800 \text{ Kg} = 48 \text{ kN}$$

$$L = 48 \text{ KN}$$

### *Carga Sismo*

$$E = 0.30 * D$$

$$E = 2881,50 \text{ Kg} = 28 \text{ kN}$$

### *Carga Viento*

$$Pv = \frac{1}{2} * da * Vv^2$$

$$Pv = 4.30$$

$$A = 4.40 \text{ m}^2$$

$$W = N * \frac{Pv}{A}$$

$$W = 6 * \frac{4.3}{4.4} = 0,01 \text{ kN}$$

Una vez obtenidas las cargas para el tramo 17-18, se calculó las combinaciones respectivas según el “ASD”, los resultados se pueden observar en la “Tabla 11”.

Tabla 11. Combinaciones de cargas.

Combinaciones de cargas		
1)	U=D	96,33 KN
2)	U= D+L	143,41 KN
3)	U= D+E	125,22 KN
4)	U= D+0,75L+0,75(0,6W)	131,64 KN
5)	U= D+0,75L+0,75(0,7E)	146,81 KN
6)	U= 0,6D+0,6W	57,80 KN
7)	U=0,6 D+0,7 E	78,02 KN

[Fuente: Propia]

Se realizó el mismo análisis para cada una de las pilonas como se observa en la “Tabla 12”.

Tabla 12. Determinación de cargas para cada pilona.

Pilona	Presión del viento (Pa)	Peso cabina (kg)	Peso cable (kg/m)	Peso x cabinas (kg)	Carga Muerta (kN)	Carga Viva (kN)	Carga Sismo (kN)	Carga Viento (kN)
1	42,58	920	12,40	920	12,07	7,85	3,60	0,01
2	42,58	920	12,40	2760	44,73	23,54	13,40	0,03
3	42,58	920	12,40	3680	63,13	31,39	18,90	0,04
4	42,58	920	12,40	3680	67,92	31,39	20,40	0,04
5	42,58	920	12,40	2760	48,30	23,54	14,50	0,03
6	42,58	920	12,40	1840	28,97	15,70	8,70	0,02
7	42,58	920	12,40	1840	28,92	15,70	8,70	0,02
8	42,58	920	12,40	920	17,38	7,85	5,20	0,01
9	42,58	920	12,40	920	13,67	7,85	4,10	0,01
10	42,58	920	12,40	920	18,45	7,85	5,50	0,01
11	42,58	920	12,40	3680	63,56	31,39	19,10	0,04
12	42,58	920	12,40	2760	50,60	23,54	15,20	0,03
13	42,58	920	12,40	3680	63,78	31,39	19,10	0,04
14	42,58	920	12,40	4600	74,72	39,24	22,40	0,05
15	42,58	920	12,40	1840	32,04	15,70	9,60	0,02
16	42,58	920	12,40	3680	66,38	31,39	19,90	0,04
17	42,58	920	12,40	5520	95,22	47,09	28,60	0,06
18	42,58	920	12,40	920	17,85	7,85	5,40	0,01
19	42,58	920	12,40	920	13,07	7,85	3,90	0,01
20	42,58	920	12,40	920	16,92	7,85	5,10	0,01
21	42,58	920	12,40	2760	43,12	23,54	12,90	0,03
22	42,58	920	12,40	1840	34,95	15,70	10,50	0,02
23	42,58	920	12,40	920	19,08	7,85	5,70	0,01
24	42,58	920	12,40	920	17,98	7,85	5,40	0,01
25	42,58	920	12,40	4600	74,62	39,24	22,40	0,05
26	42,58	920	12,40	2760	46,00	23,54	13,80	0,03
27	42,58	920	12,40	1840	26,74	15,70	8,00	0,02

[Fuente: Propia]

### 2.3.1.4. Modelación del trazado mediante SAP 2000.

Las combinaciones de cargas antes descritas se las programo en la modelación realizada en el programa “SAP 2000”, dentro del modelo se incluyó el trazado en base a la topografía de la línea Ofelia -Roldós, tal como lo muestra en la “Figura 2.9”.

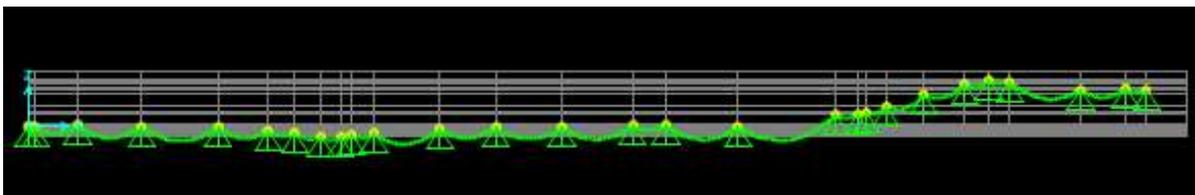


Figura 2.9.. Trazado: Línea Ofelia-Roldós.  
[Fuente: Propia, SAP 2000]

Definición de materiales para el cable.

Con la finalidad de obtener un modelo confiable, los requerimientos del cable se los obtuvo de los informes del estudio complementario para la ingeniería del proyecto Quito cables, donde se especifica los siguientes parámetros como fundamentales; Diámetro mínimo 54 mm, densidad lineal 12.5 kg/m, acero galvanizado 6x36 WSR, y se los incluyen con la simulación como se puede observar en la “Figura 2.10” y “Figura 2.11”.

General Data	
Material Name and Display Color	MATERIAL_CABLE
Material Type	Steel
Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	
Weight per Unit Volume	76.9723
Mass per Unit Volume	7.849
Units	
KN, m, C	
Isotropic Property Data	
Modulus of Elasticity, E	54917240
Poisson's Ratio, U	0.3
Coefficient of Thermal Expansion, A	1.250E-05
Shear Modulus, G	21122015
Other Properties for Steel Materials	
Minimum Yield Stress, Fy	1960000.
Minimum Tensile Stress, Fu	2044.
Effective Yield Stress, Fye	2469600.
Effective Tensile Stress, Fue	2636.76

Figura 2.10. Propiedades del material-CABLE.  
[Fuente: Propia, SAP 2000]

Cable Section Data

**Cable Section Name** CABLE\_TRAZADO  
 Section Notes

Cable Material  
 Material Property  MATERIAL\_CABLE

Cable Properties

Specify Cable Diameter 54,8  
 Specify Cable Area 2358,5821  
 Torsional Constant 885364,5  
 Moment of Inertia 442682,3  
 Shear Area 2122,7239

Units  
 KN, mm, C

Display Color

Figura 2.11. Propiedades geométricas-CABLE.  
 [Fuente: Propia, SAP 2000]

Definición de cargas en SAP 2000 en la “Figura 2.12”.

Load Patterns

Load Pattern Name	Type	Self Weight Multiplier
DEAD	DEAD <input type="button" value="v"/>	1
DEAD	DEAD	1
VIVA	LIVE	1
SIMO	DEAD	0,3
VIENTO	WIND	1

Figura 2.12. Cargas NEC-2015.  
 [Fuente: Propia, SAP 2000]

Las cargas están distribuidas en todo el trazado de la línea.

Al igual que existe una carga crítica debido a las condiciones del tramo, existe una combinación crítica la cual ha sido evaluada, los resultados son presentados a continuación en la “Tabla 13”.

Tabla 13. Reacciones en las pilonas según la combinación crítica.

<b>TABLE: Reacciones en las pilonas</b>			
<b>Pilonas</b>	<b>Caso de Análisis</b>	<b>Tipo de carga analizada</b>	<b>Fuerza resultante_3 Eje Z</b>
Text	Text	Text	KN
1	COMB5	Combinación	10,039
2	COMB5	Combinación	69,339
3	COMB5	Combinación	166,725
4	COMB5	Combinación	208,137
5	COMB5	Combinación	194,27
6	COMB5	Combinación	112,214
7	COMB5	Combinación	92,022
8	COMB5	Combinación	48,57
9	COMB5	Combinación	37,085
10	COMB5	Combinación	51,418
11	COMB5	Combinación	128,477
12	COMB5	Combinación	188,84
13	COMB5	Combinación	184,653
14	COMB5	Combinación	202,765
15	COMB5	Combinación	154
16	COMB5	Combinación	158,017
17	COMB5	Combinación	226,62
18	COMB5	Combinación	196,114
19	COMB5	Combinación	34,347
20	COMB5	Combinación	26,763
21	COMB5	Combinación	88,167
22	COMB5	Combinación	122,4
23	COMB5	Combinación	116,069
24	COMB5	Combinación	88,016
25	COMB5	Combinación	148,718
26	COMB5	Combinación	152,037
27	COMB5	Combinación	108,095
28	COMB5	Combinación	24,253

[Fuente: Propia, Sap 2000]

### 2.3.2. Determinación del número de poleas.

El tren de balancines está compuesto por rodillos denominadas poleas, la cantidad de estos en cada tren depende de la corrección de la trayectoria que deba realizarse en la piona, en base a eso se determinó el número de poleas que lo componen.

La corrección que se debe producir en los trenes depende del cable y el ángulo con el que ingresa y con el que sale como se encuentra esquematizado en la “Figura 2.13”, en base a esto se determina el ángulo de corrección para cada piona, como lo muestra la siguiente tabla.

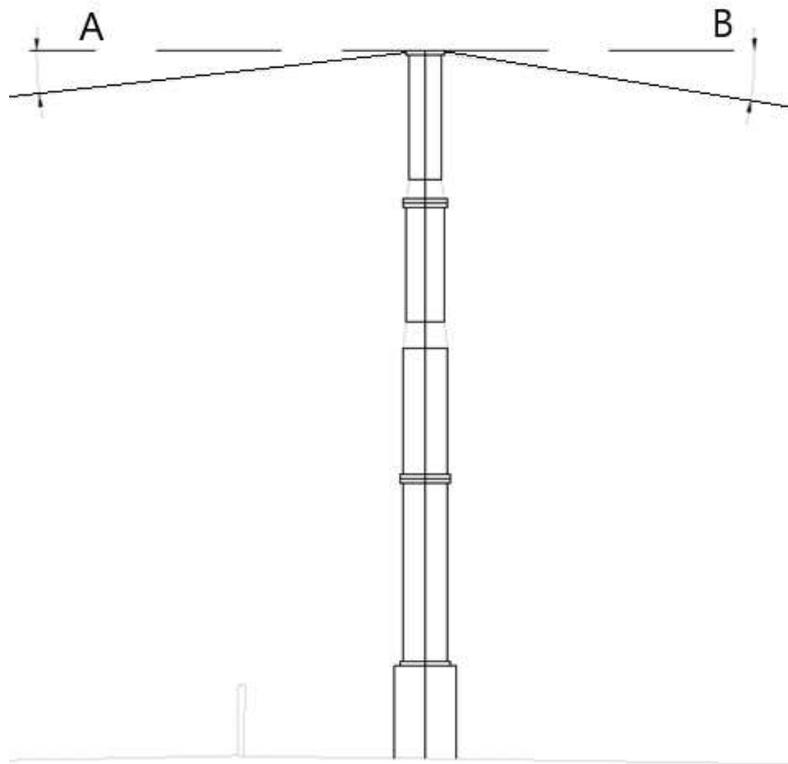


Figura 2.13. Propiedades geométricas-CABLE.  
[Fuente: Propia, SAP 2000]

En la figura se puede observar la definición de  $a$  y  $b$ , que corresponde a los ángulos formados por la catenaria en la llegada a la torre ( $a$ ) y a la salida de la torre ( $b$ ), y en la “Tabla 14” se puede observar el ángulo corregido para cada piona, obtenidos mediante la ecuación (12).

$$\alpha_{\text{correc}} = a + b [\text{rad}]$$

Donde:

$\alpha_{\text{corrección}}$ : Ángulo de corrección.

a: ángulo formado por la catenaria a la llegada.

b: ángulo formado por la catenaria a la salida.

Tabla 14. Ángulos de corrección para cada pylon (rad)

PILONAS	A	B	CORREGIDO
P1	0,00	0,66	0,66
P2	0,36	0,46	0,82
P3	0,15	0,14	0,29
P4	0,10	0,14	0,23
P5	0,11	0,17	0,28
P6	0,05	0,14	0,19
P7	0,03	0,28	0,31
P8	0,10	0,07	0,17
P9	0,08	0,03	0,12
P10	0,17	0,00	0,17
P11	0,16	0,04	0,20
P12	0,20	0,08	0,28
P13	0,14	0,11	0,25
P14	0,13	0,11	0,24
P15	0,14	0,09	0,22
P16	0,10	0,13	0,24
P17	0,50	0,41	0,91
P18	0,25	0,05	0,30
P19	0,11	0,15	0,26
P20	0,16	0,24	0,40
P21	0,40	0,19	0,59
P22	0,39	0,27	0,66
P23	0,29	0,06	0,35
P24	0,23	0,12	0,34
P25	0,00	0,24	0,25
P26	0,00	0,08	0,08
P27	0,13	0,15	0,29

[Fuente: Propia]

Una vez obtenidos los ángulos de corrección se procedió a determinar el número idóneo de poleas para cada uno de los trenes, mediante la siguiente relación obtenida de la “Tabla 15”.

Donde el diámetro nominal del cable ( $O_c$ ) y el de los hilos de la capa exterior del mismo ( $O_h$ ), tiene una relación con el diámetro de curvatura del eje del cable que produce la polea o apoyo ( $D_c$ ); esta relación se encuentra descrita en el “Pliego de condiciones técnicas para la construcción y explotación de las instalaciones de teleféricos y funiculares para transporte de viajeros”, propiedad del gobierno de España; estas proporciones no pueden ser inferiores a las magnitudes descritas en las columnas A y B, de la tabla que se muestra a continuación. [15]

Tabla 15. Relación de diámetros

UTILIZACIÓN	EMPLAZAMIENTO		(A) Dc /Oc	(B) Dc /Oh
Cable Carril	Apoyos sin movimiento, tales como tambor de anclaje, zapatas de deflexión sin deslizamiento del cable respecto al soporte (estaciones)		65	1000
	Desviaciones en apoyos móviles (poleas de tensión, sectores móviles, cadenas).		130	1000
	Desviación en apoyos con deslizamiento (zapatas).		250	—
Cable tractor, contra-cable y de transporte.	Poleas motrices de desviación o de reenvío.		80-100	800-1000
Cable de tensión	Poleas de desviación y reenvío	Instalación con movimiento de vaivén.	50	750
		Instalación con movimiento unidireccional	40	600
	Poleas sin movimiento (de reglaje, tambores).		20	—

Fuente: Pliego de condiciones técnicas para la construcción y explotación de las instalaciones de teleféricos y funiculares para transporte de viajeros. [15]

El caso presente dentro de este estudio es el de cable tractor, contra cable y de transporte, el cual tiene una relación entre 80 y 100 entre el diámetro de la rueda imaginaria y el diámetro nominal del cable tractor-portador, se escogió lo descrito por la ecuación (13).

$$\frac{D_c}{O_c} = 85 \quad \text{EC. ( 13)}$$

Donde:

D<sub>c</sub>: Diámetro de la rueda imaginaria

O<sub>c</sub>: Diámetro nominal del cable tractor – portador.

Este diámetro de la rueda imaginaria corresponde al valor mínimo con el cual el cable no se fatigará.

Según EN12930, el coeficiente de seguridad mínimo para el cable tractor-portador debe estar en el rango entre 3 y 20; con este se determinará el radio de la rueda imaginaria real.

$$R_{ri} = \frac{D_c}{2} * FS \quad \text{EC. ( 14)}$$

Donde:

R<sub>ri</sub>: Radio de rueda real

FS: Factor de seguridad

Se determinó la longitud mínima ocupada por un tren de poleas en base a la “Figura 2.14”, tomando como datos el radio de la rueda imaginaria real y el ángulo a corregir por el mecanismo en su totalidad, como lo muestra la ecuación (15).

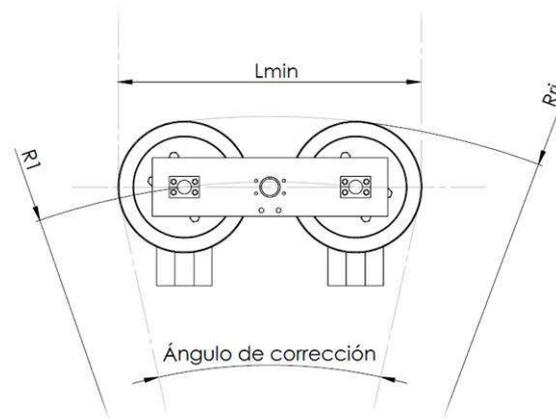


Figura 2.14. Longitud mínima del balancín.  
[Fuente: Propia]

$$L_{min} = R_{ri} \times \alpha \quad \text{EC. ( 15)}$$

Donde:

$L_{min}$ : Longitud mínima del tren de poleas

$R_{ri}$ : Radio de rueda imaginaria real

El conjunto total de poleas en un tren corrige el ángulo en su totalidad; es decir, cada polea del tren corregirá una fracción del ángulo; con este análisis se obtiene la ecuación 16, que a su vez se relaciona con la ecuación (17):

$$L_2 = \alpha_2 \times R_1 \quad \text{EC. ( 16)}$$

Donde:

$L_2$ : Longitud del arco que ocupa un par de poleas.

$R_p$ : Radio de la polea

$\alpha_2$ : Ángulo de corrección de un par de poleas.

En base a la "Figura 2.11", se obtiene:

$$R1 = Rri - Rp \quad \text{EC. ( 17)}$$

Con lo anteriormente expuesto, se realiza la siguiente suposición, con la cual se determina el ángulo a corregir por un par de poleas, ecuación (18):

$$\alpha_2 = \frac{L_2}{Rri - Rp} [rad]$$

$$L_2 \cong 4Rp$$

$$\alpha_2 = \frac{L_2}{Rri - Rp} [rad] \quad \text{EC. ( 18)}$$

Donde:

$\alpha_2$ : Ángulo a corregir por un par de poleas

$L_2$ : Longitud de arco que ocupa un par de poleas.

Al obtener la magnitud del ángulo a corregir total, se puede obtener el ángulo a corregir para una sola polea, descrito en la ecuación (19).

$$\alpha_1 = \frac{2Rp}{Rri - Rp} [rad] \quad \text{EC. ( 19)}$$

Donde:

$\alpha_1$ : Ángulo a corregir por una polea

Al ya haber obtenido el ángulo total a corregir y el corregido por una sola polea, se definirá el número total de poleas necesarias del tren mediante la siguiente ecuación:

$$N_p = \frac{\alpha \text{ correc}}{\alpha_1} \quad \text{EC. ( 20)}$$

### Ejemplo de cálculo: Utilizando las ecuaciones previamente descritas

- Ángulo de corrección, ecuación (12)

$$\alpha_{\text{correc}} = a + b \text{ [rad]}$$

$$\alpha_{\text{correc}} = 0,50 + 0,41$$

$$\alpha_{\text{correc}} = 0,91 \text{ [rad]}$$

- Diámetro de la rueda imaginaria, ecuación (13)

$$\frac{D_c}{O_c} = 85$$

$$D_c = 85 O_c = 85(54) = 4590 \text{ mm}$$

$$D_c = 4,59 \text{ m}$$

- Radio de la rueda imaginaria real, ecuación (14)

$$R_{ri} = \frac{D_c}{2} * FS$$

$$R_{ri} = \frac{4,59}{2} * 3,50$$

$$R_{ri} = 8,03 \text{ m}$$

$$R_1 = R_{ri} - R_p$$

$$R_1 = 8,03 - 0,31$$

$$R_1 = 7,72 \text{ m}$$

- Longitud de arco que ocupa un par de poleas, ecuación (16)

$$L_2 \cong 4R_p$$

$$L_2 = 4 * 0,31 = 1,24 \text{ m}$$

- Ángulo que corregir por un par de poleas, ecuación (18)

$$\alpha_2 = \frac{4R_p}{Rr_i - R_p} [rad]$$

$$\alpha_2 = 0,16 \text{ rad}$$

- Ángulo que corregir por una sola polea, ecuación (19)

$$\alpha_1 = \frac{2R_p}{Rr_i - R_p} [rad]$$

$$\alpha_1 = \frac{0,62}{7,72}$$

$$\alpha_1 = 0,08 [rad]$$

- Número total de poleas del tren, ecuación (20)

$$N_p = \frac{\alpha_{\text{correc}}}{\alpha_1}$$

$$N_p = \frac{0,3702}{0,0322}$$

$$N_p = 11,21$$

### 2.3.3. Dimensionamiento de ejes.

Dentro del sistema de trenes de poleas existen diferentes tipos de ejes, entre los cuales están, ejes en una polea, el eje para el balancín que están en medio de dos poleas, y de igual manera para 4 poleas, para 6 poleas y el eje principal que soporta toda la carga y este sujeto por el soporte y unido a la viga principal.

El dimensionamiento de los ejes se lo realizó mediante un análisis de fatiga debido a que las cargas son variables en el tiempo.

Para el dimensionamiento a fatiga se siguió el siguiente proceso:

### 2.3.3.1. Determinación de cargas.

Las cargas se las determina en base a las reacciones obtenidas, y el peso estructural que soporta cada eje.

Se asume cargas estables, para el diseño en base a la norma de cálculos para requisitos para instalaciones de transporte por cable destinados a personas. [4]

### 2.3.3.2. Determinación de esfuerzos en sus respectivas direcciones.

Los esfuerzos están divididos en alternantes y medios debido a que las cargas no son constantes.

Esfuerzos en las direcciones x, y. [16]

$$\sigma_{xa} = \frac{MC}{I} \quad \sigma_{xm} = \frac{MC}{I} \quad \text{EC. (21)}$$

$$\tau_{xya} = \frac{TP}{J} \quad \tau_{xym} = \frac{TP}{J} \quad \text{EC. (22)}$$

$$\text{Para ejes } \sigma_{ay'} = \sigma_{my'} = 0$$

De este análisis se obtiene los principales esfuerzos. [16]

$$\sigma_{1,2a} = \frac{\sigma_{xa} \pm \sigma_{ya}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xa} - \sigma_{ya}}{2}\right)^2 + (\tau_{xya})^2} \quad \text{EC. (23)}$$

$$\sigma_{1,2m} = \frac{\sigma_{xm} \pm \sigma_{ym}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xm} - \sigma_{ym}}{2}\right)^2 + (\tau_{xym})^2} \quad \text{EC. (24)}$$

### 2.3.3.3. Determinar la teoría de falla de los materiales.

Teoría de falla de energía de distorsión.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad \text{EC. (25)}$$

Existen tres teorías de falla que hacen referencia al comportamiento del material frente a esfuerzos externos, sin embargo, la teoría de distorsión de energía de “Von Mises” es la más acertada y la que será usada en el proceso de dimensionamiento.

### 2.3.3.4. Determinar esfuerzos equivalentes.

Teniendo en cuenta las ecuaciones de esfuerzos (23) y (24) y la teoría de distorsión de energía de los materiales (25), tenemos el siguiente análisis.

$$\sigma_{1,2a} = \frac{\sigma_{xa} \pm \sigma_{ya}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xa} - \sigma_{ya}}{2}\right)^2 + (\tau_{xya})^2}$$

si

$$a = \frac{\sigma_{xa} \pm \sigma_{ya}}{2}; \quad b = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xa} - \sigma_{ya}}{2}\right)^2 + (\tau_{xya})^2}$$

$$\sigma_1 = a + b$$

$$\sigma_2 = a - b$$

Donde :  $\sigma_a = \sigma_m$

Por lo tanto

$$\sigma a' = \sqrt{(a + b)^2 + (a + b)(a - b) + (a - b)^2}$$

$$\sigma a' = \sqrt{(a^2 + 2ab + b^2 - a^2 + ab - ba + b^2 + a^2 + 2ab + b^2)}$$

$$\sigma a' = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\sigma a' = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xa} + \sigma_{ya}}{2}\right)^2 + 3 \left(\sqrt{\left(\frac{\sigma_{xa} - \sigma_{ya}}{2}\right)^2 + (\tau_{xya})^2}\right)^2}$$

Se tiene que para ejes, los esfuerzos en  $y = 0, \sigma_{ay'} = \sigma_{my'} = 0$

$$eje = \emptyset \rightarrow c = \frac{d}{2}$$

$$I_y = I_x = \frac{\pi * d^4}{64}$$

$$J = I_x + I_y = \frac{\pi * d^4}{32}$$

Teniendo en cuenta la ecuación de esfuerzo, para ejes tenemos como resultado

$$\sigma_{xa} = \sigma_{xm} = kf \left( \frac{32M}{\pi * d^3} \right)$$

$$\tau_{xya} = \tau_{xym} = kfs \left( \frac{16T}{\pi * d^3} \right)$$

Donde

$$kf = 1 + q (kt - 1) \quad \text{EC. ( 26)}$$

q=factor de corrección de acuerdo con el material

Kt=factor de concentrador de esfuerzos debido al cambio de sección.

Kf=factor de corregido del concentrador de esfuerzos.

$$\sigma_{a'} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xa}}{2}\right)^2 + 3 \left( \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xa}}{2}\right)^2 + (\tau_{xya})^2} \right)^2} \quad \text{EC. ( 27)}$$

Por lo tanto

$$\sigma_{m'} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xm}}{2}\right)^2 + 3 \left( \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xm}}{2}\right)^2 + (\tau_{xym})^2} \right)^2} \quad \text{EC. ( 28)}$$

Remplazando las ecuaciones de esfuerzos para ejes en las direcciones “x”- “xy”, en las ecuaciones (27) y (28), obtenemos las siguientes expresiones de esfuerzos equivalentes para ejes.

$$\sigma a' = (16/(\pi * d^3))\sqrt{4(kf * Ma)^2 + 3(Kfs * \tau a)^2} \quad \text{EC. ( 29)}$$

$$\sigma m' = (16/(\pi * d^3))\sqrt{4(kf * Mm)^2 + 3(Kfs * \tau m)^2} \quad \text{EC. ( 30)}$$

Esta ecuación define los cambios de sección en el eje en los puntos críticos de haberlos, tomando en cuenta el material.

### 2.3.3.5. Determinar la teoría de falla a fatiga.

Teoría de falla a fatiga de Goodman [16]

$$\frac{\sigma a}{Se} + \frac{\sigma m}{Sut} = \frac{1}{n} \quad \text{EC. ( 31)}$$

Teoría de falla a fatiga de Soderberg [16]

$$\frac{\sigma a}{Se} + \frac{\sigma m}{Sy} = \frac{1}{n} \quad \text{EC. ( 32)}$$

### 2.3.3.6. Definir una fórmula para el dimensionamiento de ejes en base a criterios de falla a fatiga y las teorías de falla por energía de distorsión.

Teniendo en cuenta las ecuaciones (29) y (30) de los esfuerzos equivalentes y remplazándolas en las ecuaciones (31) y (32) se tiene como resultado un análisis de que nos permite definir una expresión que describa las dimensiones de un eje bajo los criterios de falla de “Von Mises” y de los criterios de falla a fatiga.

Se tiene para la teoría de falla de Goodman.

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3 Se} \sqrt{4(kf.Ma)^2 + 3(kfs.Ta)^2} + \frac{16}{\pi d^3 Sut} \sqrt{4(kf.Mm)^2 + 3(kfs.Tm)^2}$$

Despejando “d= diámetro”.

$$d = \sqrt[3]{\frac{16n}{\pi} \left( \frac{\sqrt{4(kf \cdot Ma)^2 + 3(kfs \cdot Ta)^2}}{Se} + \frac{\sqrt{4(kf \cdot Mm)^2 + 3(kfs \cdot Tm)^2}}{Sut} \right)} \quad \text{EC. ( 33)}$$

Se tiene para la teoría de falla de Ed-Soderberg.

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3 Se} \sqrt{4(kf \cdot Ma)^2 + 3(kfs \cdot Ta)^2} + \frac{16}{\pi d^3 Sy} \sqrt{4(kf \cdot Mm)^2 + 3(kfs \cdot Tm)^2}$$

Despejando “d= diámetro”.

$$d = \sqrt[3]{\frac{16n}{\pi} \left( \frac{\sqrt{4(kf \cdot Ma)^2 + 3(kfs \cdot Ta)^2}}{Se} + \frac{\sqrt{4(kf \cdot Mm)^2 + 3(kfs \cdot Tm)^2}}{Sy} \right)} \quad \text{EC. ( 34)}$$

En nuestro sistema de trenes de poleas no existe torque debido a los rodamientos, por lo tanto, solo existen cargas axiales en los bocines que son transmitidas al eje en forma uniforme y se obtiene cargas puntuales en la línea de acción de la carga, y es ahí donde se realiza el análisis.

El factor de seguridad utilizado “n” en las ecuaciones de Goodman y Soderberg para el diámetro de los ejes, se toma en base a los criterios de la norma “AENOR UNE-EN-12930: Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinadas a personas”, en donde especifica los factores a tomar en cuenta para diversas aplicaciones de 3 a 20, dependiendo del tipo de cables y tipo de cargas, debido a que nuestro sistema cuenta con un cable portador-tractor y está sometido a cargas de tracción, compresión y mixtas se ha decidido tomar un valor alto por encima de los mínimos recomendados el cual es n=5.

Los ejes están diseñados en base a su punto más crítico, el cual está ubicado en cercano al centro debido a la distribución de cargas, por lo tanto, en estos puntos no existe cambio de sección, ni cambios de geometría.

Por lo tanto, se tiene:

$$Kf = 1$$

$$Kfs = 1$$

$$\tau_a = \tau_m = 0$$

Las cargas a pesar de no ser constantes se pueden asumir que son estables para el análisis y diseño. [4]

Debido a que las cargas son estables el momento alternante para el análisis lo describimos como despreciable, y como resultado tenemos la ecuación (35) y (36).

$$M_a \cong 0 \quad \text{EC. ( 35)}$$

$$M_m = \frac{M_{max} + M_{min}}{2} \quad \text{EC. ( 36)}$$

La nueva ecuación del diámetro del eje.

Goodman

$$d = \sqrt[3]{\frac{16n}{\pi} \left( \frac{\sqrt{4(M_m)^2}}{S_{ut}} \right)} \quad \text{EC. ( 37)}$$

Ed-Soderberg

$$d = \sqrt[3]{\frac{16n}{\pi} \left( \frac{\sqrt{4(M_m)^2}}{S_y} \right)} \quad \text{EC. ( 38)}$$

### 2.3.3.7. Ejemplo de cálculo: Tren De poleas de 12, Pilona 17.

Para los ejes de cada polea y para los ejes de 2 poleas tipo 2, (cortos), se ha seleccionado el acero AISI 304, por sus propiedades y debido a las solicitaciones a las que está expuesto, y para los demás ejes se utilizara el acero AISI 4340 bonificado, el cual posee un mayor  $S_{ut}$  y  $S_y$ .

#### Eje para una polea

Para el cálculo se debe tener en cuenta la carga que se ejerce en cada polea y adicionalmente el peso estructural que soporta cada eje, el cual está en la “Tabla 16”.

Tabla 16. Peso estructural para 1 eje

Peso estructural que soporta el eje de la polea	
Descripción	Peso (kg)
Peso de 1 polea	69
Bocín	1,30
Rodamiento	4,83
Chapa metálica	13
Peso estructural total	88,13

Peso estructural total	0,88 KN
------------------------	---------

[Fuente: Propia]

Datos de entrada

$$Carga\ para\ 1\ poela = 18,9\ kN$$

$$Carga\ de\ peso\ estructural = 0.88\ kN$$

$$Carga\ que\ soporta\ el\ eje\ de\ 1\ polea = 19,8\ kN$$

$$Carga\ que\ soporta\ el\ eje\ de\ 1\ polea = P1 = 4451,22\ lbf$$

Material

AISI 304 (INOX)

$S_{ut} = 76\ ksi$

$S_y = 40\ ksi$

$$S_e = 0.5(76) = 38 \text{ Ksi}$$

$$n = \text{factor de seguridad} = 5$$

Para determinar el momento medio y momento alternante se tomarán en cuenta las ecuaciones (35) y (36), en base las magnitudes de la “Figura 2.15”.

$$M_a \cong 0$$

$$M_m = \frac{M_{max} + M_{min}}{2}$$

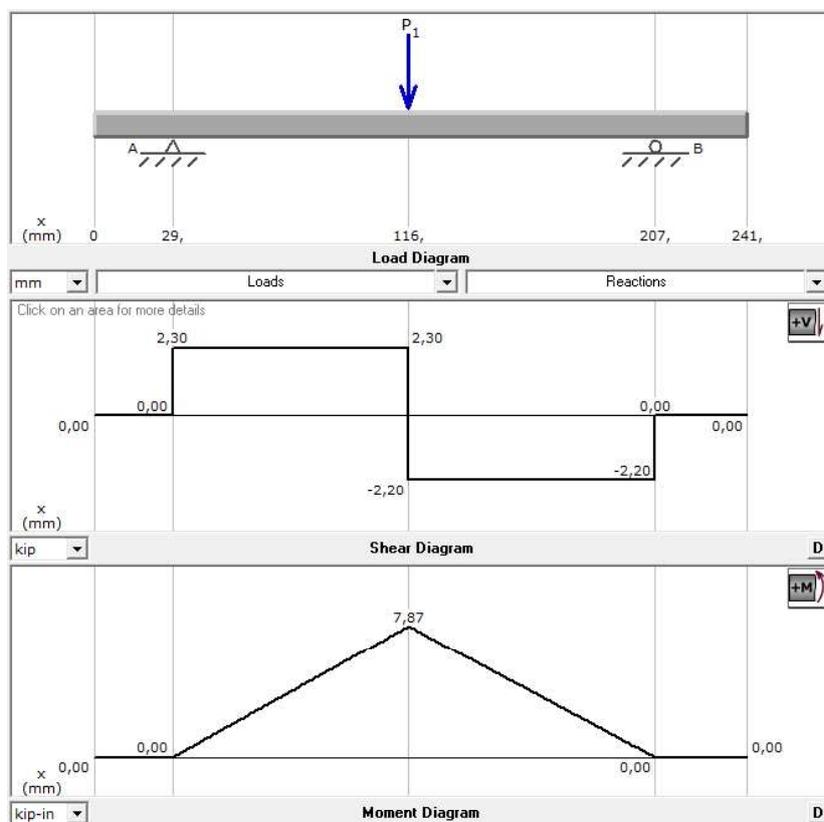


Figura 2.15. Diagrama de fuerzas y momento flector Eje 1 polea-tren 12.  
[Fuente: Propia, MD Solid]

Se obtiene las siguientes magnitudes.

$$M_{max} = 7870 \text{ lb} - \text{in}$$

$$M_{min} = 0$$

$$M_m = 3935 \text{ lb} - \text{in}$$

Según la ecuación (37) y (38)

*Goodman*

$$d = \sqrt[3]{\frac{16(5)}{\pi} \left( \frac{\sqrt{4(3935)^2}}{76} \right)}$$

$$d = 1,40 \text{ in}$$

*Ed – Soderberg*

$$d = \sqrt[3]{\frac{16(5)}{\pi} \left( \frac{\sqrt{4(3935)^2}}{40} \right)}$$

$$d = 1,70 \text{ in}$$

*Diametro selecionado = 2" EJE AISI 304, ANEXO 15*

Esfuerzos equivalentes generados en el eje debido a las cargas actuantes con el diámetro seleccionado.

$$Mm = 3935 \text{ lb} - \text{in}$$

$$\sigma m' = (16/(\pi * d^3)) \sqrt{4(kf * Mm)^2}$$

$$\sigma m' = (16/(\pi * d^3)) \sqrt{4(kf * Mm)^2}$$

$$\sigma m' = (16/(\pi * 2^3)) \sqrt{4(1 * 3935)^2}$$

$$\sigma m' = 5,01 \text{ Ksi}$$

La carga puede variar dependiendo del número de personas que se transporta, se sabe que la carga viva producida por las personas es el 30 % de la carga total considerada, para el caso más crítico la carga total es de 236,36 (KN) de la cual 48 (KN) pertenecen a la carga no permanente, en todo el tramo esta carga equivale entre al 20% de la carga total, se considera una carga extra del 10% de la carga, por lo tanto. Para el caso suigéneris de que las cabinas se encuentren vacías se generara un esfuerzo alternante igual al 30% del esfuerzo medio, debido a que no existen esfuerzos negativos, esto se aplica para el cálculo de factores de seguridad de cada eje.

Por lo tanto, se obtiene:

$$\sigma a' = 0,3 * \sigma m' \quad \text{EC. ( 39)}$$

$$\sigma a' = 1,50 \text{ Ksi}$$

Cálculo de factores de seguridad.

*Factor de seguridad estático.*

$$\sigma a + \sigma m = \frac{Sy}{n}$$
$$n = \frac{40}{5,01 + 1,50} = 6,14$$

*Goodman*

$$\frac{\sigma a}{Se} + \frac{\sigma m}{Sut} = \frac{1}{n}$$
$$n = \frac{1}{\frac{1,5}{38} + \frac{5,01}{76}} = 9,48$$

*Soderberg*

$$\frac{\sigma a}{Se} + \frac{\sigma m}{Sy} = \frac{1}{n}$$
$$n = \frac{1}{\frac{1,5}{38} + \frac{5,01}{40}} = 6,07$$

### **Identificación de la zona en la que trabaja el eje seleccionado.**

Para el análisis a fatiga y durabilidad se analizó los esfuerzos equivalentes producidos en los ejes en comparecencia con las resistencias propias del material, esto permitió definir que los ejes con la primera iteración de la resistencia a la fatiga ( $Se = \frac{1}{2} Sut$ ), se encuentran en zona segura de trabajo por debajo de las curvas de

Goodman y Soderberg, como se puede observar en la Figura (2.16), para el material AISI 304 Inox.

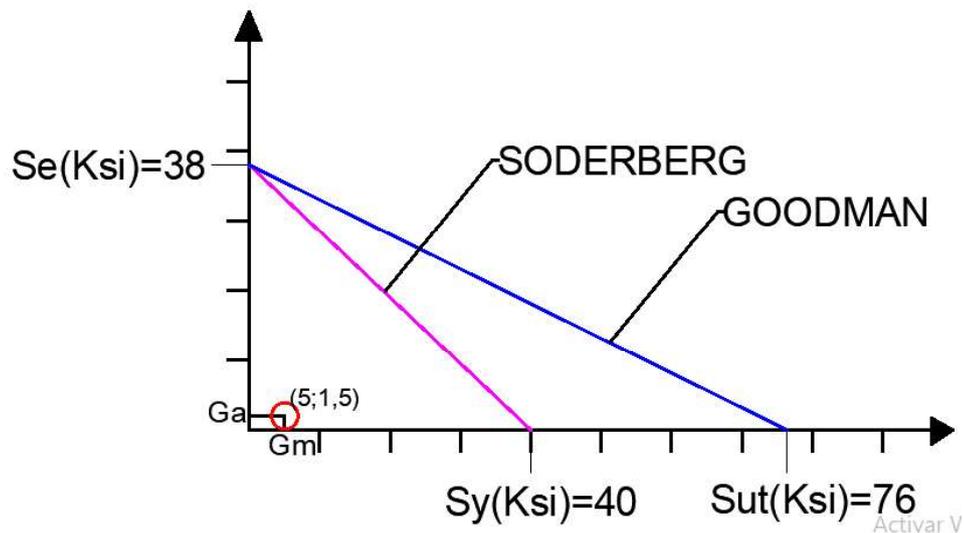


Figura 2.16'. Curvas de falla Se'

[Fuente: Propia]

La resistencia a la fatiga "Se" modificado.

La resistencia a la fatiga se puede ver alterado por varios factores como son acabado superficial, dimensiones, tipo de carga actuante, temperatura, y la confiabilidad que requerimos para obtener mejores resultados, aplicando estos factores se obtiene una resistencia a la fatiga más real con la cual se analizó si el elemento está en zona segura de falla.

$$Se = Ka kb kc kd ke * 0.5 \quad \text{EC. ( 40)}$$

Ka, coeficiente de acabado superficial= 0,857

Kb, coeficiente de forma (d=2") = 0,82

Kc, coeficiente de carga (flexión) = 1

Kd, coeficiente de temperatura (T= 20-30°) = 1

Ke, coeficiente de confiabilidad (99%) = 0,814

Por lo tanto, se tiene:

$$Se = 0.857 * 0.82 * 1 * 1 * 0.814 * 38 = 21,74 \text{ Ksi}$$

En la figura (2.17), se puede observar las curvas de falla con la resistencia a la fatiga modificado y con una escala en el eje "X" y "Y", de 10 (ksi) cada segmento, el elemento está representado por un punto cartesiano que se mantiene en la zona segura de falla.

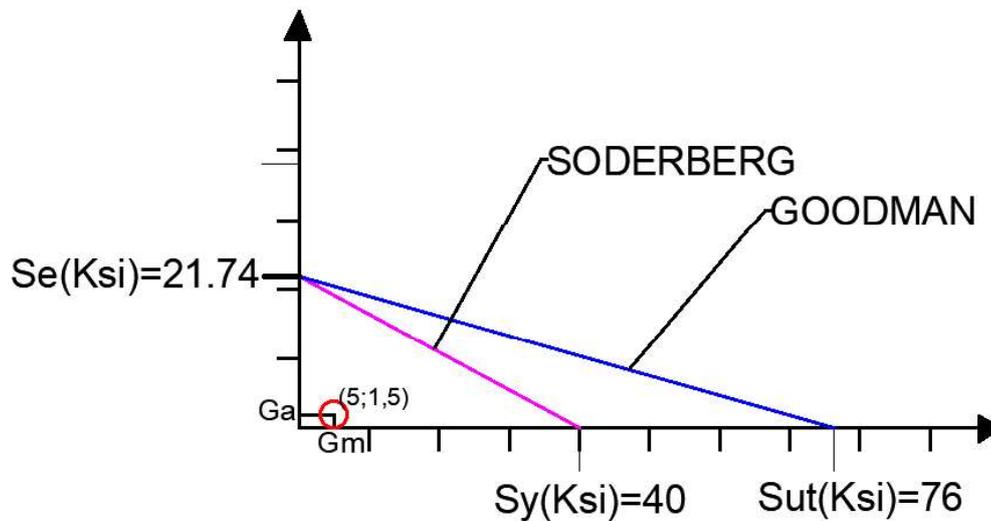


Figura 2.17. Curvas de Falla " Se real"

[Fuente: Propia]

Cálculo de factores de seguridad, con la resistencia a la fatiga modificada.

*Goodman*

$$\frac{\sigma a}{Se} + \frac{\sigma m}{Sut} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{1.50}{21,74} + \frac{5,01}{76}} = 7,27$$

*Soderberg*

$$\frac{\sigma a}{Se} + \frac{\sigma m}{Sy} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{1.50}{21,74} + \frac{5,01}{40}} \cong 5,08$$

## Eje para dos poleas

Para el cálculo se debe tener en cuenta la carga que se ejerce en cada polea y adicionalmente el peso estructural que soporta el eje, el cual está en la “Tabla 17”.

Tabla 17. Peso estructural para 1 eje de 2 poleas

Peso estructural que soporta el eje de 2 poleas normal.	
Descripción	Peso (kg)
Peso 1 POLEA (2)	176,26
Eje 1 polea (2)	13,20
Bocín para el eje 2 poleas	3
Placas de conexión (2)	36
Anti-descarrilador	7,90
Peso estructural total	236,36
Peso estructural total	2,36 KN

[Fuente: Propia]

Datos de entrada

$$Carga\ para\ 2\ poleas = 37,80\ kN$$

$$Carga\ de\ peso\ estructural = 2,36\ kN$$

$$Carga\ que\ soporta\ el\ eje\ de\ 2\ poleas = 40,16\ kN$$

$$Carga\ que\ soporta\ el\ eje\ de\ 2\ poleas = P1 = 9028,33\ lbf$$

Material

AISI 304

$$S_{ut} = 76\ ksi$$

$$S_y = 40\ ksi$$

$$n = \text{factor de seguridad} = 5$$

Para determinar el momento medio y momento alternante se tomarán en cuenta las ecuaciones (35) y (36).

$$M_a \cong 0$$

$$M_m = \frac{M_{max} + M_{min}}{2}$$

La información proporcionada por Figura 2.18, donde podremos observar los diagramas de momento flector y cortante que se producen en el eje debido a la carga actuante.

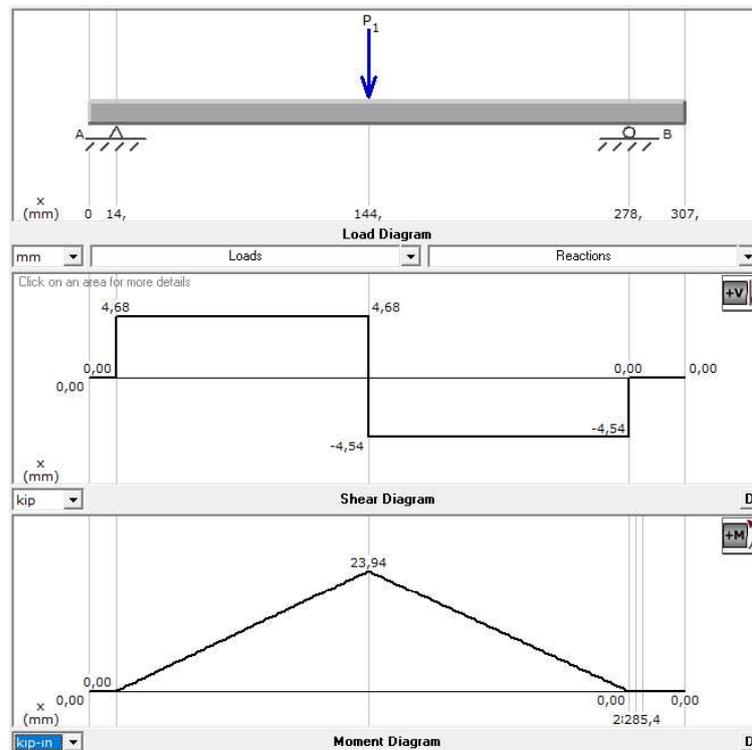


Figura 2.18. Diagrama de fuerzas y momento flector Eje 2 poleas-tren 12.  
[Fuente: Propia, MD Solid]

Se obtiene las siguientes magnitudes.

$$M_{max} = 23940 \text{ lb} - \text{in}$$

$$M_{min} = 0$$

$$M_m = 11970 \text{ lb} - \text{in}$$

Se tiene en base a la ecuación (37).

*Goodman*

$$d = \sqrt[3]{\frac{16(5)}{\pi} \left( \frac{\sqrt{4(11970)^2}}{76} \right)}$$

$$d = 2 \text{ in}$$

Se tiene en base a la ecuación (38).

*Ed – Soderberg*

$$d = \sqrt[3]{\frac{16(5)}{\pi} \left( \frac{\sqrt{4(11970)^2}}{40} \right)}$$

$$d = 2,50 \text{ in}$$

*Diametro selecionado = 2 – 1/2" EJE AISI 304, ANEXO 15*

Esfuerzos equivalentes generados en el eje debido a las cargas actuantes con el diámetro seleccionado.

$$Mm = 11970 \text{ lb – in}$$

$$\sigma m' = (16/(\pi * d^3)) \sqrt{4(kf * Mm)^2}$$

$$\sigma m' = (16/(\pi * d^3)) \sqrt{4(kf * Mm)^2}$$

$$\sigma m' = (16/(\pi * 2^3)) \sqrt{4(1 * 11970)^2}$$

$$\sigma m' = 7,80 \text{ Ksi}$$

Según la ecuación (39)

$$\sigma a' = 0,3 * \sigma m' = 2,34 \text{ Ksi}$$

Cálculo de factores de seguridad.

*Factor de seguridad estático.*

$$\sigma a + \sigma m = \frac{Sy}{n}$$

$$n = \frac{40}{2,34 + 7,80} = 3,94$$

*Goodman*

$$\frac{\sigma a}{Se} + \frac{\sigma m}{Sut} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{2,34}{38} + \frac{7,80}{76}} = 6,08$$

Soderberg

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{2,34}{38} + \frac{7,8}{40}} = 3,90$$

### Identificación de la zona en la que trabaja el eje seleccionado.

Para el análisis a fatiga y durabilidad se analizó los esfuerzos equivalentes producidos en los ejes en comparecencia con las resistencias propias del material, esto permitió definir que los ejes con la primera iteración de la resistencia a la fatiga ( $S_e = \frac{1}{2} S_{ut}$ ), se encuentran en zona segura de trabajo por debajo de las curvas de Goodman y Soderberg, como se puede observar en la Figura (2.19), para el material AISI 304 Inox.

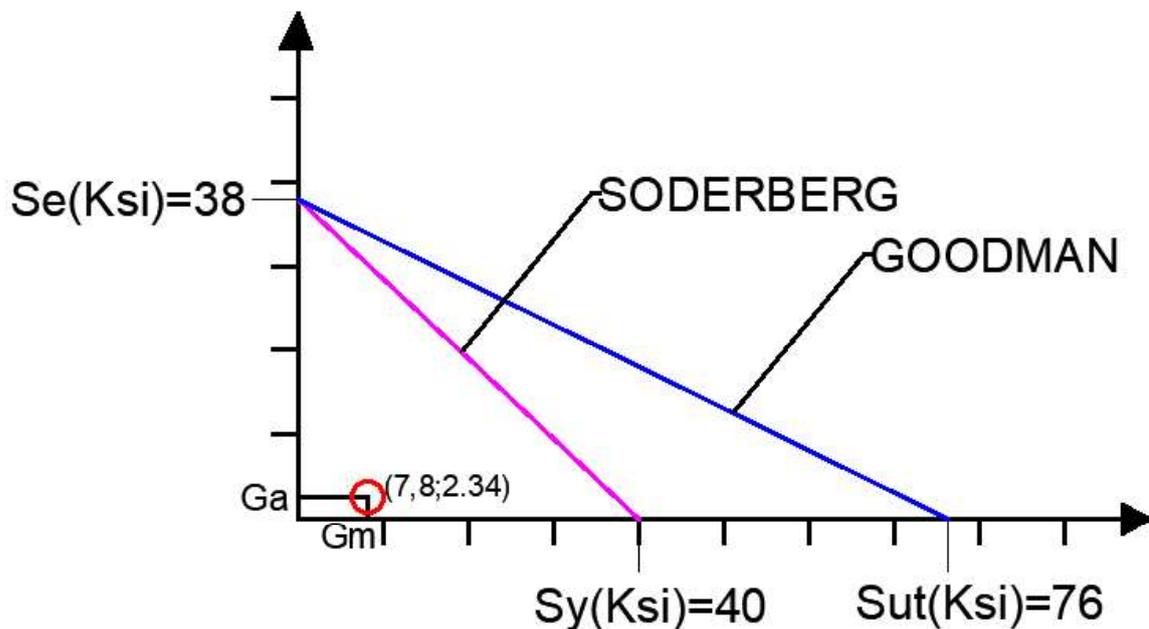


Figura 2.19. Curvas de falla  $S_e'$  Eje 2 Poleas corto

[Fuente: Propia]

La resistencia a la fatiga “ $S_e$ ” modificado, ecuación (40).

$$S_e = K_a k_b k_c k_d k_e * 0.5 S_{ut}$$

Ka, coeficiente de acabado superficial= 0,857

Kb, coeficiente de forma ( $d \geq 2''$ ) = 0,79

Kc, coeficiente de carga (flexión) = 1

Kd, coeficiente de temperatura ( $T = 20-30^\circ$ ) = 1

Ke, coeficiente de confiabilidad (99%) = 0,814

$$S_e = 0.857 * 0.82 * 1 * 1 * 0.814 * 38 = 21 \text{ Ksi}$$

En la figura (2.20), se puede observar las curvas de falla con la resistencia a la fatiga modificado y con una escala en el eje "X" y "Y", de 10 (ksi) cada segmento, el elemento está representado por un punto cartesiano que se mantiene en la zona segura de falla.

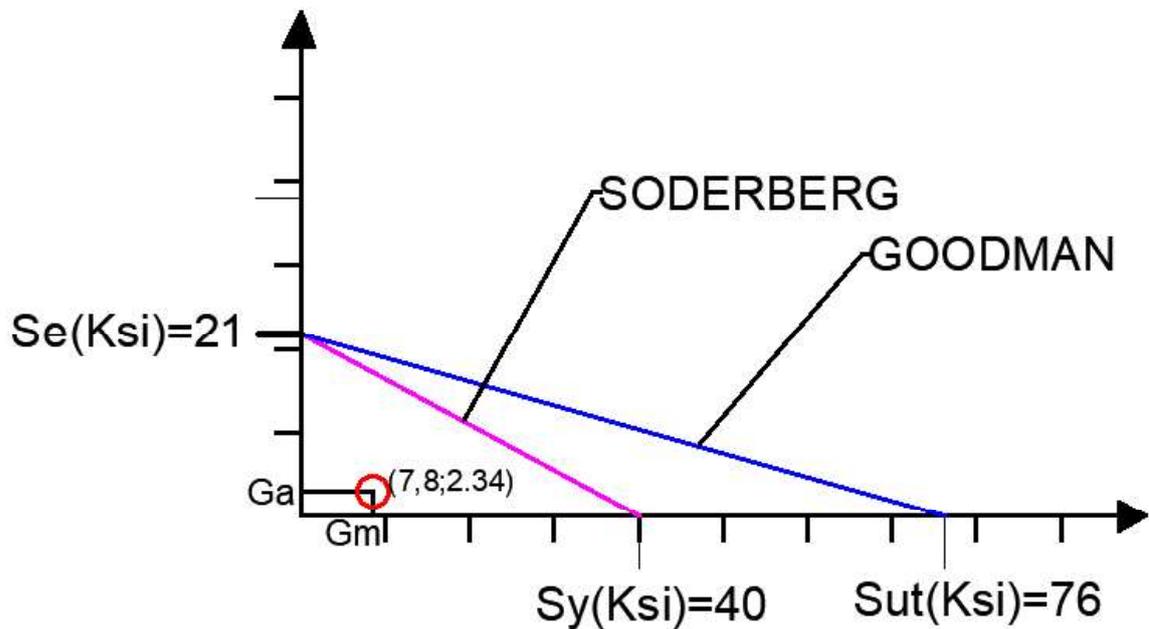


Figura 2.20. Curvas de Falla " Se real"

[Fuente: Propia]

Cálculo de factores de seguridad, con la resistencia la fatiga modificada.

*Goodman*

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{2,34}{21} + \frac{5,01}{76}} = 4,67$$

*Soderberg*

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{2,34}{21} + \frac{5,01}{40}} \cong 3,26$$

Para cargas estables el esfuerzo alternante se lo puede considerar despreciable.

### Eje para dos poleas (Tipo largo)

Para el cálculo se debe tener en cuenta la carga que se ejerce en cada polea y adicionalmente el peso estructural que soporta este eje como se observa en la "Tabla 18".

Tabla 18. Peso estructural para 1 eje de 2 poleas-tipo largo

Peso estructural que soporta el eje de 2 poleas (Tipo largo).	
Descripción	Peso (kg)
Peso estructural 2 poleas	236,36
Bocín	3
Peso estructural total	239,36

Peso estructural total	2,39 KN
------------------------	---------

[Fuente: Propia]

Datos de entrada

$$Carga\ para\ 2\ poleas = 37,8\ kN$$

*Carga de peso estructural = 2,39 kN*

*Carga que soporta el eje de 2 poleas = 40,19 kN*

*Carga que soporta el eje de 2 poleas = P1 = 9035,10 lbf*

*Material*

*AISI 4340*

*Sut = 175 ksi*

*Sy = 116 ksi*

*n = factor de seguridad = 5*

Para determinar el momento medio y momento alternante se tomarán en cuenta las ecuaciones (35) y (36) y la información proporcionada por la “Figura 2.21”.

$$M_a \cong 0$$

$$M_m = \frac{M_{max} + M_{min}}{2}$$

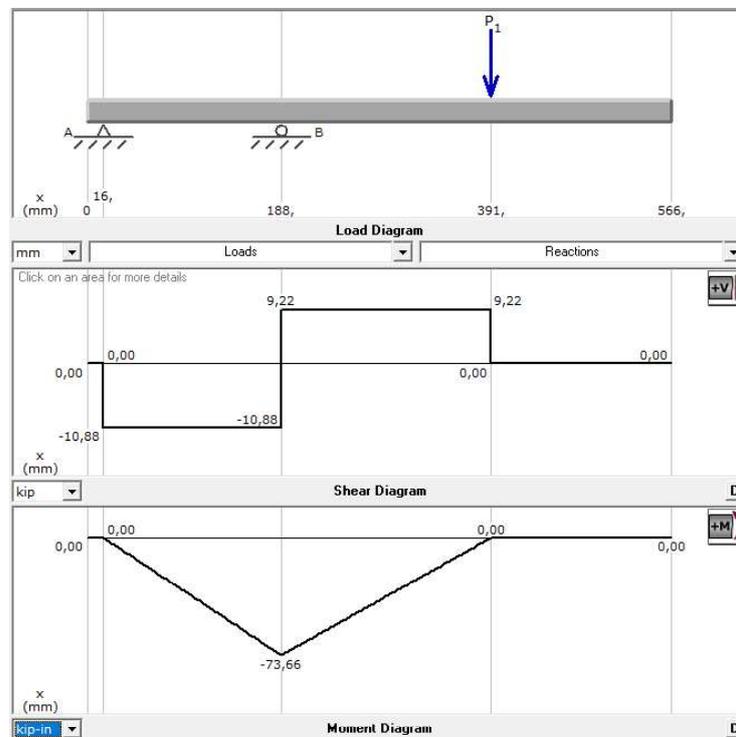


Figura 2.21. Diagrama de fuerzas y momento flector Eje 2 poleas tipo largo -tren 12.  
[Fuente: Propia, MD Solid]

Se obtiene las siguientes magnitudes.

$$M_{max} = 73660 \text{ lb} - \text{in}$$

$$M_{min} = 0$$

$$M_m = 36830 \text{ lb} - \text{in}$$

Se tiene en base a la ecuación (37).

*Goodman*

$$d = \sqrt[3]{\frac{16(5)}{\pi} \left( \frac{\sqrt{4(36830)^2}}{175} \right)} = 2,02 \text{ in}$$

Se tiene en base a la ecuación (38).

*Ed – Soderberg*

$$d = \sqrt[3]{\frac{16(5)}{\pi} \left( \frac{\sqrt{4(36830)^2}}{116} \right)} = 2,50 \text{ in}$$

*Diametro seleccionado = 2 – 1/2" EJE AISI 4340, ANEXO 15*

Cálculo de los esfuerzos equivalentes generados en el eje debido a las cargas actuantes con el diámetro seleccionado.

$$M_m = 36830 \text{ lb} - \text{in}$$

$$\sigma_m' = (16/(\pi * d^3)) \sqrt{4(kf * M_m)^2}$$

$$\sigma_m' = (16/(\pi * d^3)) \sqrt{4(kf * M_m)^2}$$

$$\sigma_m' = (16/(\pi * 2^3)) \sqrt{4(1 * 36830)^2}$$

$$\sigma_m' = 24 \text{ Ksi}$$

De la ecuación (39), se obtiene:

$$\sigma_a' = 0,3 * \sigma_m'$$

EC. (41)

$$\sigma_a' = 7,20 \text{ Ksi}$$

Cálculo de factores de seguridad.

*Factor de seguridad estático.*

$$\sigma_a + \sigma_m = \frac{S_y}{n}$$
$$n = \frac{116}{7,20 + 24} = 3,72$$

*Goodman*

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$
$$n = \frac{1}{\frac{7,20}{87,5} + \frac{24}{175}} = 4,56$$

*Soderberg*

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n}$$
$$n = \frac{1}{\frac{7,20}{87,5} + \frac{24}{116}} = 3,46$$

### **Identificación de la zona en la que trabaja el eje seleccionado.**

Para el análisis a fatiga y durabilidad se analizó los esfuerzos equivalentes producidos en los ejes en comparación con las resistencias propias del material, esto permitió definir que los ejes con la primera iteración de la resistencia a la fatiga ( $S_e = \frac{1}{2} S_{ut}$ ).

El elemento se encuentra en zona segura de trabajo por debajo de las curvas de Goodman y Soderberg, como se puede observar en la Figura (2.22), para el material AISI 4340.

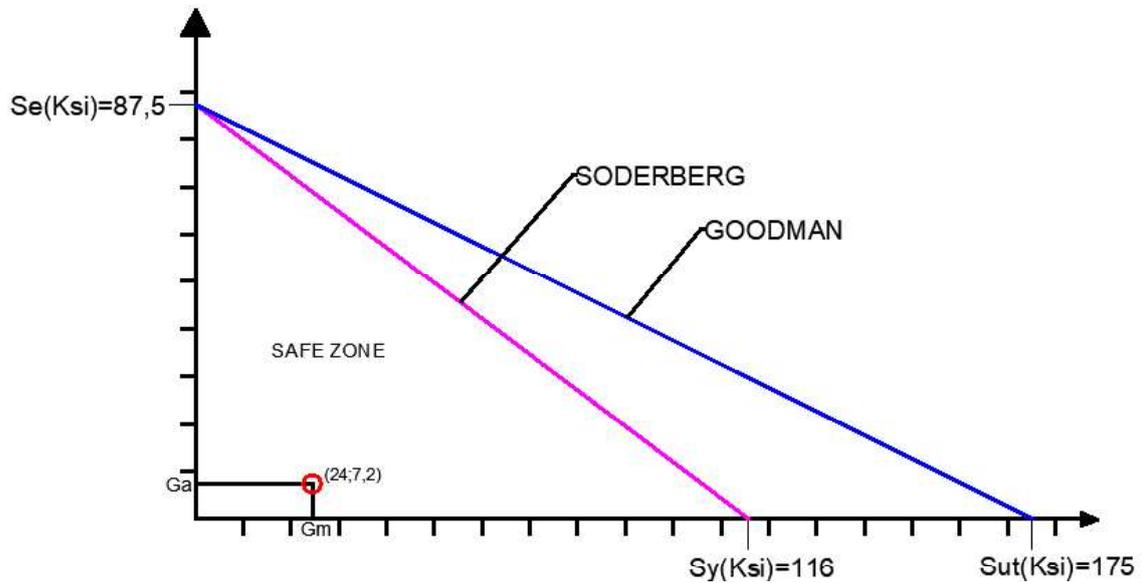


Figura 2.22'. Curvas de falla  $Se'$ , Eje de 2 Poleas largo, AISI 4340

[Fuente: Propia]

La resistencia a la fatiga “ $Se$ ” modificado.

La resistencia a la fatiga se puede ver alterado por varios factores como son acabado superficial, dimensiones, tipo de carga actuante, temperatura, y la confiabilidad que requerimos para obtener mejores resultados, aplicando estos factores se obtiene una resistencia a la fatiga más real con la cual se analizó si el elemento está en zona segura de falla.

$K_a$ , coeficiente de acabado superficial = 0,857

$K_b$ , coeficiente de forma ( $d > 2''$ ) = 0,79

$K_c$ , coeficiente de carga (flexión) = 1

$K_d$ , coeficiente de temperatura ( $T = 20-30^\circ$ ) = 1

$K_e$ , coeficiente de confiabilidad (99%) = 0,814

Por lo tanto, se tiene de la ecuación (40):

$$Se = 0.857 * 0.79 * 1 * 1 * 0.814 * 87,5 = 50,1 \text{ Ksi}$$

En la figura (2.23), se puede observar las curvas de falla con la resistencia a la fatiga modificado y con una escala en el eje "X" y "Y", de 10 (ksi) cada segmento, el elemento está representado por un punto cartesiano que se mantiene en la zona segura de falla.

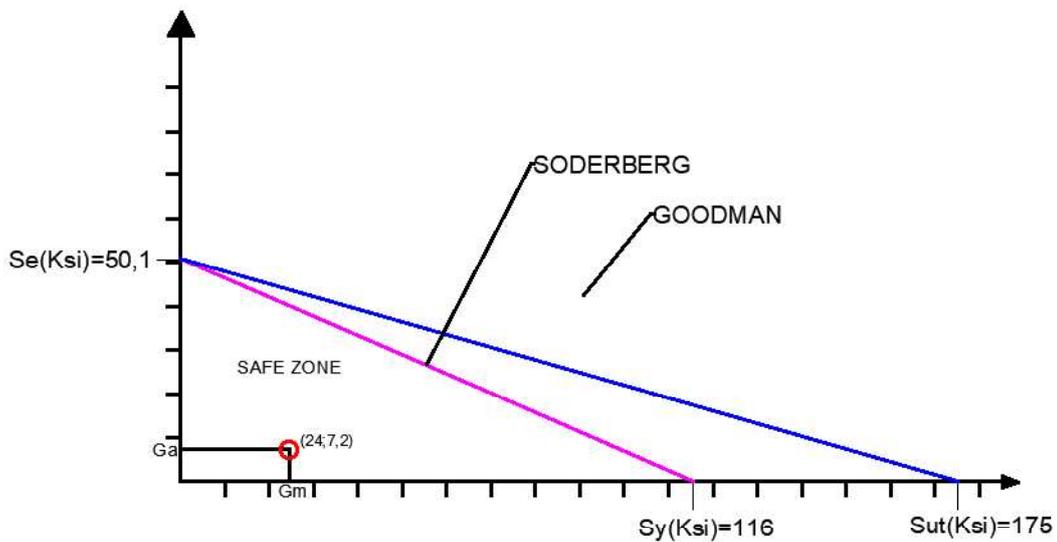


Figura 2.23. Curvas de Falla " Se real", Eje de 2 Poleas largo, AISI 4340

[Fuente: Propia]

Cálculo de factores de seguridad, con la resistencia a la fatiga modificada.

*Goodman*

$$\frac{\sigma_a}{Se} + \frac{\sigma_m}{Sut} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{1,50}{50,1} + \frac{5,01}{175}} = 3,56$$

*Soderberg*

$$\frac{\sigma_a}{Se} + \frac{\sigma_m}{Sy} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{1,50}{50,1} + \frac{5,01}{116}} \cong 2,85$$

## Eje para 4 poleas

Para el cálculo se debe tener en cuenta la carga que se ejerce en cada polea y adicionalmente el peso estructural, el cual se encuentra en la "Tabla 19".

Tabla 19. Peso estructural para 1 eje de 4 poleas-Tren de 12 poleas

Peso estructural que soporta el eje de 4 poleas.	
Descripción	Peso (kg)
Peso estructural 4 poleas	472,72
Placas de conexión (2)	60
Eje 2 Poleas (2)	23
Bocín 1 eje de 4 poleas	3,30
Bocín 2 eje de 4 poleas	2,25
Peso estructural total	561,27

Peso estructural total	5,61 kN
------------------------	---------

[Fuente: Propia]

Datos de entrada

$$Carga\ para\ 4\ poleas = 75,60\ kN$$

$$Carga\ de\ peso\ estructural = 5,61\ kN$$

$$Carga\ que\ soporta\ el\ eje\ de\ 4\ poleas = 81,21\ kN$$

$$Carga\ que\ soporta\ el\ eje\ de\ 4\ poleas = P1 = 18256,70\ lbf$$

*Material*

*AISI 4340*

$$S_{ut} = 175\ ksi$$

$$S_y = 116\ ksi$$

$$n = \text{factor de seguridad} = 4,5 - 5$$

Para determinar el momento medio y momento alternante se tomarán en cuenta las ecuaciones (35) y (26).

$$M_a \cong 0$$

$$M_m = \frac{M_{max} + M_{min}}{2}$$

En la figura (2.24), se pueden observar las cargas actuantes en el eje y el momento generado por las cargas.

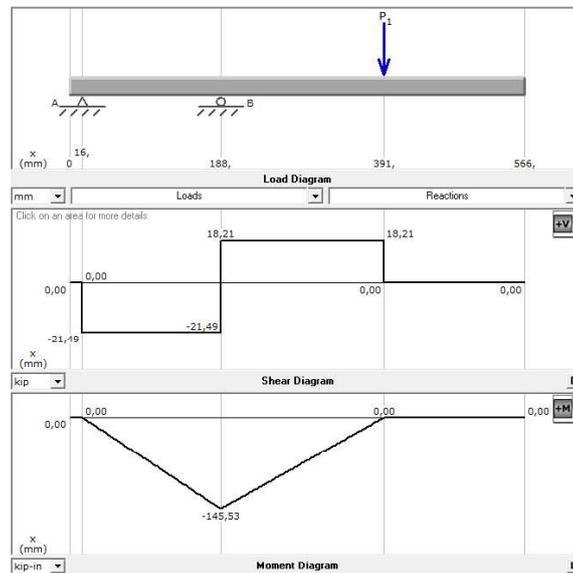


Figura 2.24. Diagrama de fuerzas y momento flector Eje 4 poleas -tren 12.  
[Fuente: Propia, MD Solid]

Se tiene las siguientes magnitudes.

$$M_{max} = 145530 \text{ lb} - \text{in}$$

$$M_m = 72765 \text{ lb} - \text{in}$$

Se tiene en base a la ecuación (37) y (38).

*Goodman*

$$d = \sqrt[3]{\frac{16(5)}{\pi} \left( \frac{\sqrt{4(72765)^2}}{175} \right)}$$

$$d = 2,80 \text{ in}$$

*Ed – Soderberg*

$$d = \sqrt[3]{\frac{16(4.5)}{\pi} \left( \frac{\sqrt{4(72765)^2}}{116} \right)}$$

$$d = 3 \text{ in}$$

*Diametro selecionado = 3 " EJE AISI 4340, ANEXO 15*

Cálculo de los esfuerzos equivalentes generados en el eje debido a las cargas actuantes con el diámetro seleccionado.

$$Mm = 72765 \text{ lb} - \text{in}$$

$$\sigma m' = (16/(\pi * d^3))\sqrt{4(kf * Mm)^2}$$

$$\sigma m' = (16/(\pi * d^3))\sqrt{4(kf * Mm)^2}$$

$$\sigma m' = (16/(\pi * 2^3))\sqrt{4(1 * 72765)^2}$$

$$\sigma m' = 27,45 \text{ Ksi}$$

De la ecuación (39), se obtiene:

$$\sigma a' = 0,3 * \sigma m' \quad \text{EC. ( 42)}$$

$$\sigma a' = 8,23 \text{ Ksi}$$

Cálculo de factores de seguridad.

*Factor de seguridad estático.*

$$\sigma a + \sigma m = \frac{Sy}{n}$$

$$n = \frac{116}{8,23 + 27,45} = 3,25$$

*Goodman*

$$\frac{\sigma a}{Se} + \frac{\sigma m}{Sut} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{8,23}{87,5} + \frac{27,45}{175}} = 3,98$$

*Soderberg*

$$\frac{\sigma a}{Se} + \frac{\sigma m}{Sy} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{8,23}{87,5} + \frac{27,45}{116}} = 3,02$$

## Identificación de la zona en la que trabaja el eje seleccionado.

Para el análisis a fatiga y durabilidad se analizó los esfuerzos equivalentes producidos en los ejes en comparación con las resistencias propias del material, esto permitió definir que los ejes con la primera iteración de la resistencia a la fatiga ( $Se = \frac{1}{2} Sut$ ).

El elemento se encuentra en zona segura de trabajo por debajo de las curvas de Goodman y Soderberg, como se puede observar en la Figura (2.25), para el material AISI 4340.

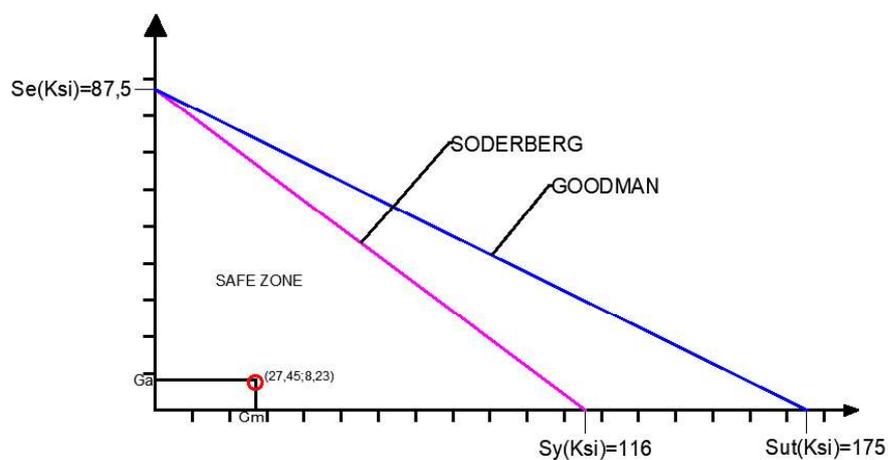


Figura 2.25'. Curvas de falla  $Se'$ , Eje de 4 Poleas largo, AISI 4340

[Fuente: Propia]

La resistencia a la fatiga ( $Se$ ) se puede ver alterado por varios factores como son acabado superficial, dimensiones, tipo de carga actuante, temperatura, y la confiabilidad que requerimos para obtener mejores resultados, aplicando estos factores se obtiene una resistencia a la fatiga más real con la cual se analizó si el elemento está en zona segura de falla.

$Ka$ , coeficiente de acabado superficial = 0,857

$Kb$ , coeficiente de forma ( $d > 2''$ ) = 0,79

$Kc$ , coeficiente de carga (flexión) = 1

$Kd$ , coeficiente de temperatura ( $T = 20-30^\circ$ ) = 1

Ke, coeficiente de confiabilidad (99%) = 0,814

Por lo tanto, se tiene de la ecuación (40):

$$Se = 0.857 * 0.79 * 1 * 1 * 0.814 * 87,5 = 50,1 \text{ Ksi}$$

En la figura (2.26), se puede observar las curvas de falla con la resistencia a la fatiga modificado y con una escala en el eje "X" y "Y", de 10 (ksi) cada segmento, el elemento está representado por un punto cartesiano que se mantiene en la zona segura de falla.

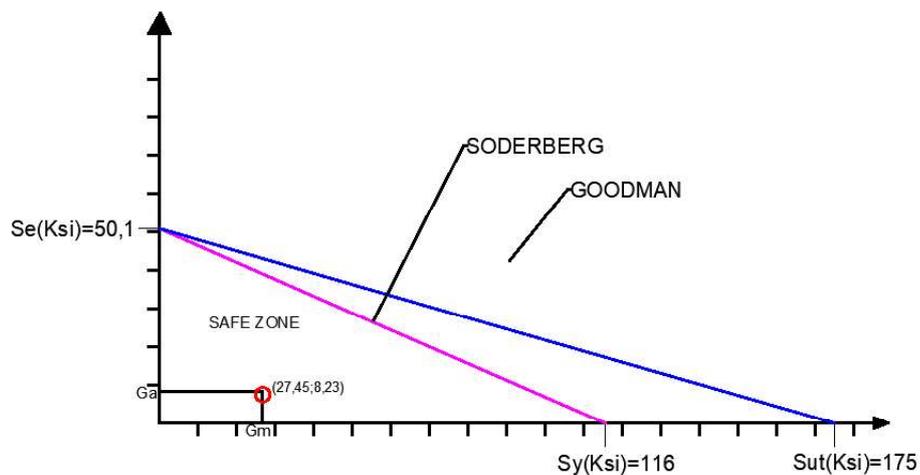


Figura 2.26. Curvas de Falla " Se real", Eje de 4 poleas, AISI 4340

[Fuente: Propia]

Cálculo de factores de seguridad, con la resistencia a la fatiga modificada.

*Goodman*

$$\frac{\sigma_a}{Se} + \frac{\sigma_m}{Sut} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{8,23}{50,1} + \frac{27,45}{175}} = 3,11$$

*Soderberg*

$$\frac{\sigma_a}{Se} + \frac{\sigma_m}{Sy} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{8,23}{50,1} + \frac{27,45}{116}} \cong 2,5$$

## Eje para 6 poleas.

Para el cálculo se debe tener en cuenta la carga que se ejerce en cada polea y adicionalmente el peso estructural que soporta el eje, el cual está en la “Tabla 20”.

Tabla 20. Peso estructural para 1 eje de 6 poleas-Tren de 12 poleas

Peso estructural que soporta el eje de 6 poleas.	
Descripción	Peso (kg)
Eje 4 poleas	29
Eje 2 poleas largo	19,10
Peso estructural 4 poleas	561,27
Peso estructural 2 poleas largo	239,36
Viga	112
Bocín	1,90
Placas	11,20
Peso estructural total	973,83

Peso estructural total	9,74
------------------------	------

[Fuente: Propia]

Datos de entrada

$$Carga\ para\ 6\ poleas = 113,31\ kN$$

$$Carga\ de\ peso\ estructural = 9,74\ kN$$

$$Carga\ que\ soporta\ el\ eje\ de\ 6\ poleas = P1 = 123,05\ kN = 27662,70\ lbf$$

$$AISI\ 4340$$

$$S_{ut} = 175\ ksi$$

$$S_y = 116\ ksi$$

$$n = \text{factor de seguridad} = 5$$

Para determinar el momento medio y momento alternante se tomarán en cuenta las ecuaciones (35) y (36).

$$M_a \cong 0$$

$$M_m = \frac{M_{max} + M_{min}}{2}$$

En la figura (2.27), se puede observar los diagramas de momento cortante y flector.

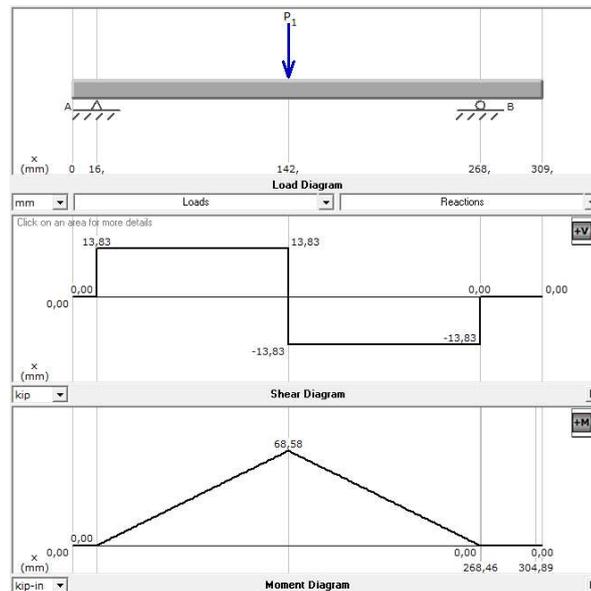


Figura 2.27. Diagrama de fuerzas y momento flector Eje 6 poleas -tren 12.  
[Fuente: Propia, MD Solid]

Se obtienen las siguientes magnitudes.

$$M_{max} = 137224.4 \text{ lb} - \text{in} / M_{min} = 0$$

$$M_m = 68612.2 \text{ lb} - \text{in}$$

En base a la ecuación (37).

*Goodman*

$$d = \sqrt[3]{\frac{16(5)}{\pi} \left( \frac{\sqrt{4(68612.2)^2}}{175} \right)} = 2,71 \text{ in}$$

En base a la ecuación (38).

*Ed – Soderberg*

$$d = \sqrt[3]{\frac{16(4.5)}{\pi} \left( \frac{\sqrt{4(68612,2)^2}}{116} \right)}$$

$$d = 3 \text{ in}$$

*Diametro selecionado = 3 " EJE AISI 4340, ANEXO 15*

Cálculo de los esfuerzos equivalentes generados en el eje debido a las cargas actuantes con el diámetro seleccionado.

$$Mm = 68612,2 \text{ lb} - \text{in}$$

$$\sigma m' = (16/(\pi * d^3))\sqrt{4(kf * Mm)^2}$$

$$\sigma m' = (16/(\pi * d^3))\sqrt{4(kf * Mm)^2}$$

$$\sigma m' = (16/(\pi * 2^3))\sqrt{4(1 * 68612,2)^2}$$

$$\sigma m' = 25,9 \text{ Ksi}$$

De la ecuación (39), se obtiene:

$$\sigma a' = 0,3 * \sigma m' \quad \text{EC. (43)}$$

$$\sigma a' = 7,77 \text{ Ksi}$$

Cálculo de factores de seguridad.

*Factor de seguridad estático.*

$$\sigma a + \sigma m = \frac{Sy}{n}$$

$$n = \frac{116}{7,77 + 25,90} = 3,45$$

*Goodman*

$$\frac{\sigma a}{Se} + \frac{\sigma m}{Sut} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{7,77}{87,5} + \frac{25,9}{175}} = 4,23$$

*Soderberg*

$$\frac{\sigma a}{Se} + \frac{\sigma m}{Sy} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{8,23}{87,5} + \frac{27,45}{116}} = 3,21$$

## Identificación de la zona en la que trabaja el eje seleccionado.

Para el análisis a fatiga y durabilidad se analizó los esfuerzos equivalentes producidos en los ejes en comparancia con las resistencias propias del material, esto permitió definir que los ejes con la primera iteración de la resistencia a la fatiga ( $Se = \frac{1}{2} Sut$ ). El elemento se encuentra en zona segura de trabajo por debajo de las curvas de Goodman y Soderberg, como se puede observar en la Figura (2.28), para el material AISI 4340.

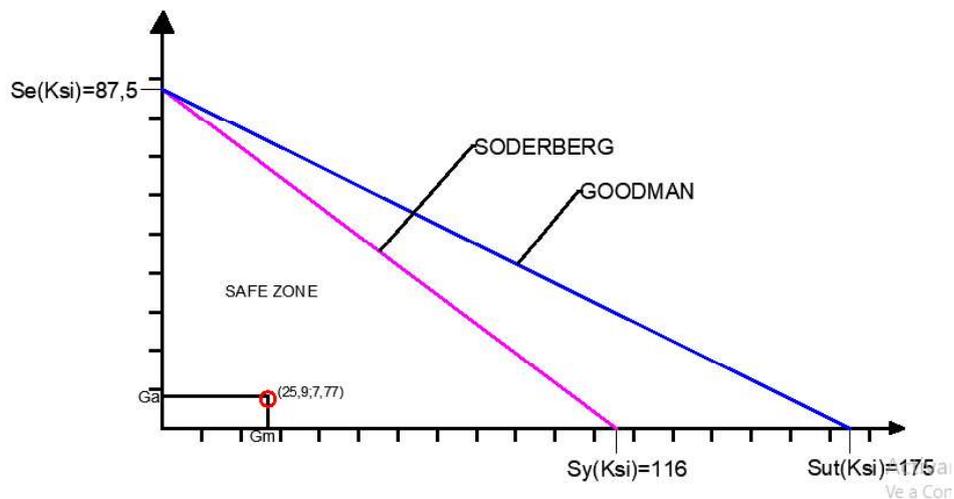


Figura 2.28'. Curvas de falla  $Se'$ , Eje de 6 Poleas, AISI 4340

[Fuente: Propia]

La resistencia a la fatiga ( $Se$ ) modificada.

$K_a$ , coeficiente de acabado superficial= 0,857

$K_b$ , coeficiente de forma ( $d > 2''$ ) = 0,79

$K_c$ , coeficiente de carga (flexión) = 1

$K_d$ , coeficiente de temperatura ( $T = 20-30^\circ$ ) = 1

$K_e$ , coeficiente de confiabilidad (99%) = 0,814

Por lo tanto, se tiene de la ecuación (40):

$$Se = 0.857 * 0.79 * 1 * 1 * 0.814 * 87,5 = 50,1 \text{ Ksi}$$

En la figura (2.29), se puede observar las curvas de falla con la resistencia a la fatiga modificado y con una escala en el eje "X" y "Y", de 10 (ksi) cada segmento, el elemento está representado por un punto cartesiano que se mantiene en la zona segura de falla.

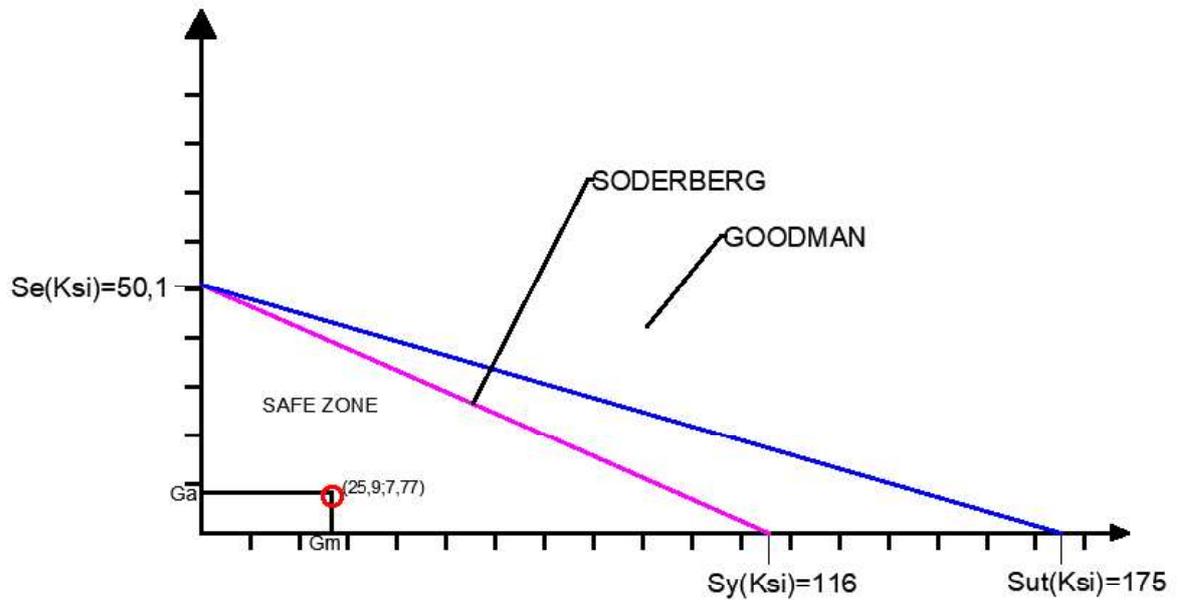


Figura 2.29. Curvas de Falla " Se real", Eje de 6 poleas, AISI 4340

[Fuente: Propia]

Cálculo de factores de seguridad, con la resistencia a la fatiga modificada.

*Goodman*

$$\frac{\sigma a}{Se} + \frac{\sigma m}{Sut} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{8,23}{50,1} + \frac{27,45}{175}} = 3,30$$

*Soderberg*

$$\frac{\sigma a}{Se} + \frac{\sigma m}{Sy} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{8,23}{50,1} + \frac{27,45}{116}} \cong 2,64$$

## Eje para 12 poleas

Para el cálculo se debe tener en cuenta la carga que se ejerce en cada polea y adicionalmente el peso estructural, el cual se encuentra en la “Tabla 21”.

Tabla 21. Peso estructural para 1 eje de 12 poleas-Tren de 12 poleas

Peso estructural que soporta el eje de 12 poleas.	
Descripción	Peso (kg)
Viga Principal	420
Placas de conexión	39,72
Bocín	4,60
Eje 6(2)	11,80
Peso estructural 6 poleas (2)	1947,66
Peso estructural total	2423,78

Peso estructural total	24,24 KN
------------------------	----------

[Fuente: Propia]

Datos de entrada

$$Carga\ para\ 12\ poleas = 226,62\ kN$$

$$Carga\ de\ peso\ estructural = 24,24\ kN$$

$$Carga\ que\ soporta\ el\ eje\ de\ 12\ poleas = 250,86\ kN$$

$$Carga\ que\ soporta\ el\ eje\ de\ 12\ poleas = P1 = 53135,842\ lbf$$

Material

AISI 4340

$$S_{ut} = 175\ ksi$$

$$S_y = 116\ ksi$$

$$n = \text{factor de seguridad} = 5$$

Para determinar el momento medio y momento alternante se tomarán en cuenta las ecuaciones (35) y (36), juntamente con la información de la “Figura 2.30”.

$$M_a \cong 0$$

$$M_m = \frac{M_{max} + M_{min}}{2}$$

En la figura 2.30 se pueden observar los diagramas de momento flector y cortante, esa información será utilizada para determinar los esfuerzos generados.

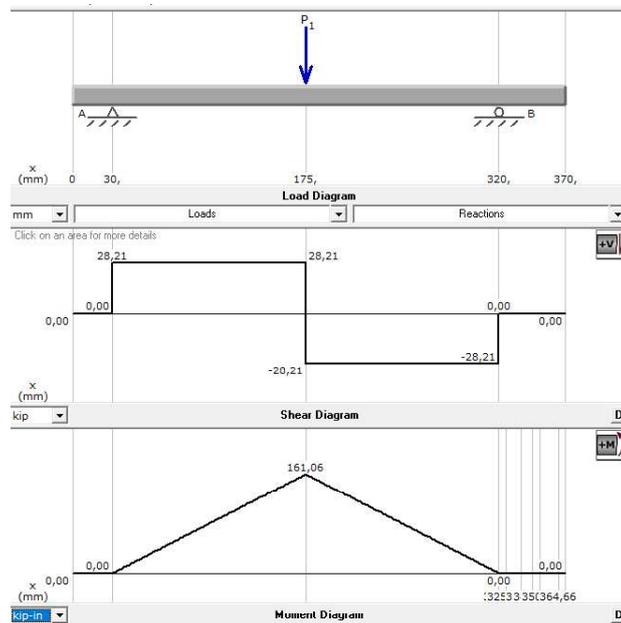


Figura 2.30. Diagrama de fuerzas y momento flector Eje 12 poleas -tren 12.  
[Fuente: Propia, MD Solid]

Se tienen las siguientes magnitudes.

$$M_{max} = 161060 \text{ lb} - \text{in}$$

$$M_{min} = 0$$

$$M_m = 80530 \text{ lb} - \text{in}$$

En base a la ecuación (37) y (38).

*Goodman*

$$d = \sqrt[3]{\frac{16(5)}{\pi} \left( \frac{\sqrt{4(80530)^2}}{175} \right)} = 2,86 \text{ in}$$

*Ed - Soderberg*

$$d = \sqrt[3]{\frac{16(5)}{\pi} \left( \frac{\sqrt{4(80530)^2}}{116} \right)} = 3,30 \text{ in}$$

*Diametro selecionado = 3 - 1/2 " EJE AISI 4340, ANEXO 15*

Cálculo de los esfuerzos equivalentes generados en el eje debido a las cargas actuantes con el diámetro seleccionado.

$$Mm = 80530 \text{ lb} - \text{in}$$

$$\sigma m' = (16/(\pi * d^3))\sqrt{4(kf * Mm)^2}$$

$$\sigma m' = (16/(\pi * d^3))\sqrt{4(kf * Mm)^2}$$

$$\sigma m' = (16/(\pi * 2^3))\sqrt{4(1 * 80530)^2}$$

$$\sigma m' = 19,13 \text{ Ksi}$$

De la ecuación (39), se obtiene:

$$\sigma a' = 0,3 * \sigma m' \quad \text{EC. ( 44)}$$

$$\sigma a' = 5,74 \text{ Ksi}$$

Cálculo de factores de seguridad.

*Factor de seguridad estático.*

$$\sigma a + \sigma m = \frac{Sy}{n}$$

$$n = \frac{116}{5,74 + 19,13} = 4,66$$

*Goodman*

$$\frac{\sigma a}{Se} + \frac{\sigma m}{Sut} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{5,74}{87,5} + \frac{19,13}{175}} = 5,72$$

*Soderberg*

$$\frac{\sigma a}{Se} + \frac{\sigma m}{Sy} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{5,74}{87,5} + \frac{19,13}{116}} = 4,34$$

## Identificación de la zona en la que trabaja el eje seleccionado.

Para el análisis a fatiga y durabilidad se analizó los esfuerzos equivalentes producidos en los ejes en comparancia con las resistencias propias del material, esto permitió definir que los ejes con la primera iteración de la resistencia a la fatiga ( $Se = \frac{1}{2} Sut$ ).

El elemento se encuentra en zona segura de trabajo por debajo de las curvas de Goodman y Soderberg, como se puede observar en la Figura (2.31), para el material AISI 4340.

La figura (2.31) describe la zona segura de falla a fatiga y los esfuerzos medios y alternantes para el eje principal del sistema, con una escala en el eje "X" y "Y", de 10 (ksi) cada segmento.

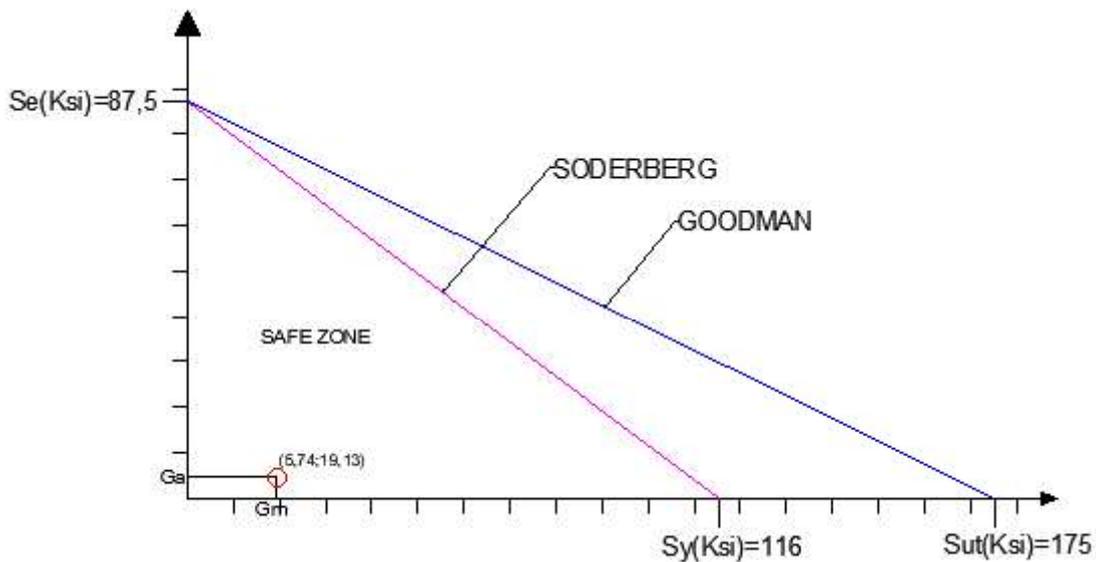


Figura 2.31'. Curvas de falla  $Se'$ , Eje de 12 Poleas, AISI 4340

[Fuente: Propia]

La resistencia a la fatiga ( $Se$ ) modificada.

$K_a$ , coeficiente de acabado superficial= 0,857

$K_b$ , coeficiente de forma ( $d > 2''$ ) = 0,79

$K_c$ , coeficiente de carga (flexión) = 1

Kd, coeficiente de temperatura (T= 20-30°) = 1

Ke, coeficiente de confiabilidad (99%) = 0,814

Por lo tanto, se tiene de la ecuación (40):

$$Se = 0.857 * 0.79 * 1 * 1 * 0.814 * 87,5 = 50,1 \text{ Ksi}$$

En la figura (2.32), se puede observar las curvas de falla con la resistencia a la fatiga modificado y con una escala en el eje "X" y "Y", de 10 (ksi) cada segmento, el elemento está representado por un punto cartesiano que se mantiene en la zona segura de falla.

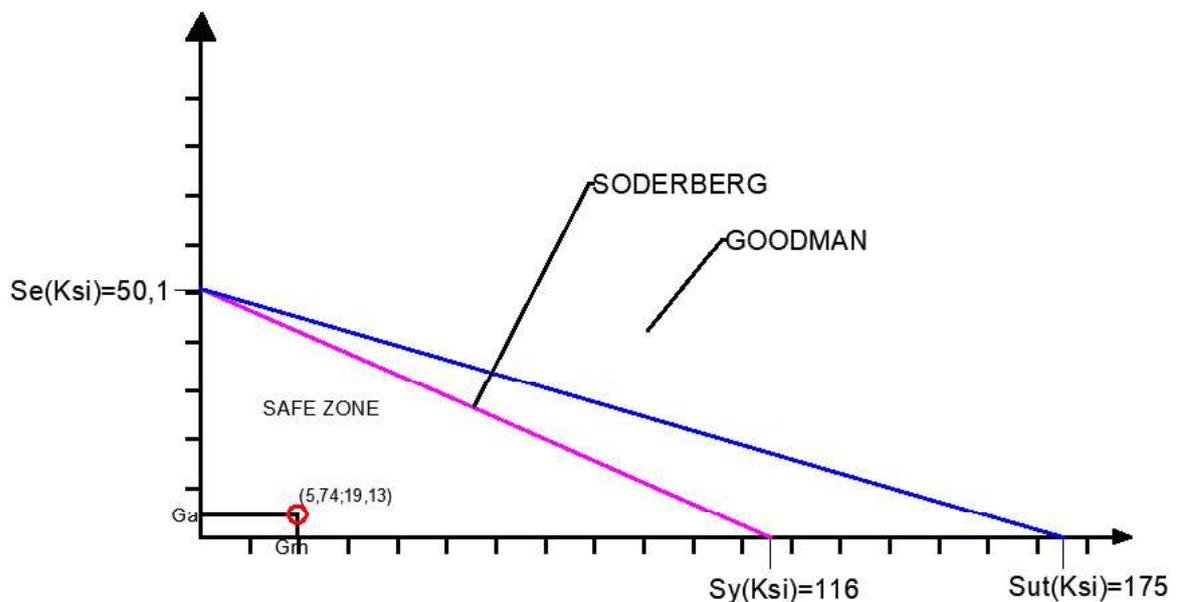


Figura 2.32. Curvas de Falla " Se real", Eje de 6 poleas, AISI 4340

[Fuente: Propia]

Cálculo de factores de seguridad, con la resistencia a la fatiga modificada.

*Goodman*

$$\frac{\sigma_a}{Se} + \frac{\sigma_m}{Sut} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{5,74}{50,1} + \frac{19,13}{175}} = 4,46$$

*Soderberg*

$$\frac{\sigma a}{Se} + \frac{\sigma m}{Sy} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{\frac{5,13}{50,1} + \frac{19,13}{116}} \cong 3,58$$

#### **2.3.4. Dimensionamiento de poleas y selección de rodamientos.**

Para facilitar el movimiento se colocó bocines que contienen al eje y transmiten la carga, seguido de rodamientos en cada polea para eliminar cargas por torsión y facilitar el movimiento y deslizamiento de las cabinas.

El diámetro de las poleas tiene como mínimo tener 9.6 veces el diámetro del cable, lo cual significa que no debe ser menor a 518 mm, con la finalidad de asegurar el guiado del cable también la profundidad de la garganta de la polea debe ser mínimo 1/3 del diámetro del cable. [4]

En nuestro diseño existen 2 tipos de poleas en cuanto a dimensiones, Ø=620 para poleas que trabajan a tracción debido a que las cargas son mayores que en trenes de poleas que trabajan a compresión y Ø=520 para poleas que trabajan a compresión debido a su baja carga.

Para la selección de rodamientos se deben tener en cuenta ciertos factores, que nos ayudan a determinar las dimensiones idóneas según las sollicitaciones y las dimensiones requeridas.

$\omega$ = Velocidad angular

L= Vida en horas.

C= Carga dinámica que va a soportar el rodamiento.

Tipo de rodamiento a usar

Dn= Diámetro nominal del rodamiento.

Una se identificó cada uno de estos parámetros se determina los factores “FI” de vida útil y “Fn” factor de velocidad para rodamientos.

Para el factor “FI” solo se necesitó el tiempo de vida útil requerido en horas para el rodamiento, este factor se lo toma de tablas.

Fn, está en función de “n” un valor obtenido a partir de las velocidades angulares con unidades en  $\text{min}^{-1}$ , ecuación (45).

$$n = \frac{1}{w * 2 * \pi} [\text{min}^{-1}] \quad \text{EC. ( 45)}$$

Con el valor de “n” se obtiene el Fn, de las tablas para rodamientos ya sea de bolas o de rodillos.

Para nuestro caso en particular se utilizó rodamientos de rodillos debido a que son capaces de absorber tanto cargas radiales como axiales. [17]

Posterior a obtener los factores necesarios, se procedió hacer el cálculo de carga dinámica equivalente.

$$P = \frac{C * fL}{fn} \quad \text{EC. ( 46)}$$

Donde

P= carga dinámica equivalente

C= es la carga radial.

FI=factor de vida útil

Fn= Factor de velocidad.

### 2.3.4.1. Ejemplo de cálculo. Tren de 12 poleas, Pilona 17.

Carga por polea = 18,83 KN.

Diámetro del eje de una polea = 2" AISI 304

La velocidad del sistema es constante = 5 m/s, en base a esto se determina la velocidad angular de las poleas.

Ø= 620 mm, Poleas a tracción

Ø=520 mm, Poleas a compresión

Cuando la velocidad es constante, se puede expresar la vida útil de los rodamientos en horas, para la selección de los rodamientos de trenes de poleas se debe tener en cuenta que el mínimo de horas de vida útil debe ser de 25000 horas. [4]

Primero obtenemos el "FI" a partir de 26000 horas de vida útil de la "Tabla 22".

Tabla 22. Valores "FI" para rodamientos de rodillos.

▼ Valores $f_L$ para rodamientos de rodillos									
$L_h$	$f_L$	$L_h$	$f_L$	$L_h$	$f_L$	$L_h$	$f_L$	$L_h$	$f_L$
h		h		h		h		h	
100	0,617	420	0,949	1700	1,44	6500	2,16	28000	3,35
110	0,635	440	0,962	1800	1,47	7000	2,21	30000	3,42
120	0,652	460	0,975	1900	1,49	7500	2,25	32000	3,48
130	0,668	480	0,988	2000	1,52	8000	2,3	34000	3,55
140	0,683	500	1	2200	1,56	8500	2,34	36000	3,61
150	0,697	550	1,03	2400	1,6	9000	2,38	38000	3,67
160	0,71	600	1,06	2600	1,64	9500	2,42	40000	3,72
170	0,724	650	1,08	2800	1,68	10000	2,46	42000	3,78
180	0,736	700	1,11	3000	1,71	11000	2,53	44000	3,83
190	0,748	750	1,13	3200	1,75	12000	2,59	46000	3,88
200	0,76	800	1,15	3400	1,78	13000	2,66	48000	3,93
220	0,782	850	1,17	3600	1,81	14000	2,72	50000	3,98
240	0,802	900	1,19	3800	1,84	15000	2,77	55000	4,1
260	0,822	950	1,21	4000	1,87	16000	2,83	60000	4,2
280	0,84	1000	1,23	4200	1,89	17000	2,88	65000	4,31
300	0,858	1100	1,27	4400	1,92	18000	2,93	70000	4,4
320	0,875	1200	1,3	4600	1,95	19000	2,98	80000	4,58
340	0,891	1300	1,33	4800	1,97	20000	3,02	90000	4,75
360	0,906	1400	1,36	5000	2	22000	3,11	100000	4,9
380	0,921	1500	1,39	5500	2,05	24000	3,19	150000	5,54
400	0,935	1600	1,42	6000	2,11	26000	3,27	200000	6,03

Fuente: [17]

Por lo tanto:

$$fl = 3.27$$

Ahora con los diámetros de cada polea y la velocidad lineal constante podemos obtener la velocidad angular de cada polea, y el factor de velocidad mediante la ecuación (45) y la tabla de  $f_n$ .

$$\omega(\text{Polea } \varnothing = 620\text{mm}) = 154 \text{ rpm}$$

$$\omega(\text{Polea } \varnothing = 520\text{mm}) = 184 \text{ rpm}$$

Ahora obtenemos "Fn" de la "Tabla 23" para cada polea en base a la ecuación (45).

$$n_{\varnothing 620} = 967.61 \rightarrow fn = 0.366$$

$$n_{\varnothing 520} = 1156.11 \rightarrow fn = 0.35$$

Tabla 23. Valores "Fn" para rodamientos de rodillos.

▼ Valores $f_n$ para rodamientos de rodillos									
$n$	$f_n$	$n$	$f_n$	$n$	$f_n$	$n$	$f_n$	$n$	$f_n$
$\text{min}^{-1}$		$\text{min}^{-1}$		$\text{min}^{-1}$		$\text{min}^{-1}$		$\text{min}^{-1}$	
10	1,44	55	0,861	340	0,498	1800	0,302	9500	0,183
11	1,39	60	0,838	360	0,49	1900	0,297	10000	0,181
12	1,36	65	0,818	380	0,482	2000	0,293	11000	0,176
13	1,33	70	0,8	400	0,475	2200	0,285	12000	0,171
14	1,3	75	0,784	420	0,468	2400	0,277	13000	0,167
15	1,27	80	0,769	440	0,461	2600	0,270	14000	0,163
16	1,25	85	0,755	460	0,455	2800	0,265	15000	0,16
17	1,22	90	0,742	480	0,449	3000	0,259	16000	0,157
18	1,2	95	0,73	500	0,444	3200	0,254	17000	0,154
19	1,18	100	0,719	550	0,431	3400	0,25	18000	0,151
20	1,17	110	0,699	600	0,42	3600	0,245	19000	0,149
22	1,13	120	0,681	650	0,41	3800	0,242	20000	0,147
24	1,1	130	0,665	700	0,401	4000	0,238	22000	0,143
26	1,08	140	0,65	750	0,393	4200	0,234	24000	0,139
28	1,05	150	0,637	800	0,385	4400	0,231	26000	0,136
30	1,03	160	0,625	850	0,378	4600	0,228	28000	0,133
32	1,01	170	0,613	900	0,372	4800	0,225	30000	0,13
34	0,994	180	0,603	950	0,366	5000	0,222	32000	0,127
36	0,977	190	0,593	1000	0,36	5500	0,216	34000	0,125
38	0,961	200	0,584	1100	0,35	6000	0,211	36000	0,123
40	0,947	220	0,568	1200	0,341	6500	0,206	38000	0,121
42	0,933	240	0,553	1300	0,333	7000	0,201	40000	0,119
44	0,92	260	0,54	1400	0,326	7500	0,197	42000	0,117
46	0,908	280	0,528	1500	0,319	8000	0,193	44000	0,116
48	0,896	300	0,517	1600	0,313	8500	0,19	46000	0,114

Fuente: [17]

Utilizando la ecuación (46), se define la carga dinámica equivalente.

$$C=18.83 \text{ Kn}$$

$$Fl= 3.27$$

$$Fn(\varnothing=620) = 0.366$$

$$Fn(\varnothing=520) = 0.35$$

*Para poleas de 620 mm – Tracción*

$$P = \frac{18,83 * 3,27}{0,366} = 168,23 \text{ kN}$$

*Para poleas de 520 mm – Compresión*

$$P = \frac{18,83 * 3,27}{0,35} = 176 \text{ kN}$$

Diámetro del eje de 1 polea= 51 mm

Bocín = 53x60 mm

Se seleccionó del catálogo FAG el rodamiento **NU412**, para las poleas del tren de 12.

Para los trenes de 10 y de 8 poleas, se tiene el rodamiento **NU2315**.

### **2.3.5. Dimensionamiento de vigas.**

El diseño estructural permite dimensionar vigas y columnas, para nuestro caso necesitaremos dimensionar vigas principales y secundarias que componen el tren de poleas, para lo cual utilizaremos la teoría de estabilidad de Euler, y el método de la ASD.

Primero debemos determinar la esbeltez de un elemento, y tener en cuenta las restricciones que presentan los elementos. [12]

$$\lambda = \frac{Lp}{rmin} < 240 \quad \text{EC. ( 47)}$$

Donde

Lp = Longitud del perfil

Rmin= radio de giro mínimo del perfil

$\lambda$  = Esbeltez.

Para el diseño se tiene diferentes teorías, sin embargo, para estructuras de elementos esbeltos, se los debe diseñar por criterios de estabilidad, Pero lo cual se tiene el esfuerzo crítico de Euler.

$$\sigma_{euler} = \frac{\pi^2 * E}{\lambda^2} \quad \text{EC. ( 48)}$$

Para el diseño por estabilidad se definió los esfuerzos de trabajo y los esfuerzos permisibles a los que está sujeto el elemento, para comprobar los cálculos se tiene la siguiente relación de esfuerzos.

$$\sigma_{admisible} > \sigma_{trabajo} \quad \text{EC. ( 49)}$$

Para asegurar la relación existe el factor de seguridad que ayuda a realizar los cálculos (fs).

Por lo tanto, se tiene que el esfuerzo admisible para un elemento esbelto será igual a:

$$\sigma_{admisible} = fb = \frac{\pi^2 * E}{\lambda^2 * FS} \quad \text{EC. ( 50)}$$

Dónde:  $E = 30 \times 10^3$  Ksi, [13]

$FS = 3.5-20$ .

Adicionalmente se debe calcular el esfuerzo generado en el elemento, con la carga generada.

$$\sigma_{trabajo=FB} = \frac{P}{A} \quad \text{EC. ( 51)}$$

Donde  $P =$  es la carga de que produce la flexión en la viga.

$A =$  Es el área transversal del perfil seleccionado.

Posterior a los cálculos se procede a verificar si el elemento está trabajando óptimamente con el índice de trabajo.

$$Ia = \frac{\sigma_{trabajo}}{\sigma_{admisible}} \quad \text{EC. ( 52)}$$

Los elementos deben tener un índice de trabajo ( $Ia < 1$ ).

### 2.3.5.1. Ejemplo de cálculo, Viga principal y secundaria para el tren de 12 poleas, Pilona 17.

El tren de poleas también está compuesto por vigas que brindan soporte a toda la estructura del sistema, cada tren este compuesto por 1 viga principal y 2 vigas secundarias. Para realizar el diseño por estabilidad, necesitamos conocer la longitud, radio de giro mínimo y el área transversal del perfil seleccionado.

Las secciones cerradas presentan mayor estabilidad, por lo cual se ha seleccionado un tipo de perfil armado rectangular para las vigas principales y secundarias.

**Viga principal = 2 canales en C de 300x120x12.**

$P1 = 56256,20 \text{ lbf}$  (Peso estructural + Carga impuesta)

$A = 19,20 \text{ in}^2$

$R_{min} = 3,80 \text{ in}$

Longitud del perfil =  $199,21 \text{ in}$

Cálculo de la esbeltez en base a la ecuación (47).

$$\lambda = \frac{Lp}{r_{min}} = \frac{199,21}{3,8} = 58,42$$

Cálculo del esfuerzo admisible en base a la ecuación (50).

$$fb = \frac{\pi^2 * E}{\lambda^2 * F_s} = \frac{\pi^2 * (30 * 10^3 \text{ Ksi})}{(58,42)^2 * 10} = 8,67 \text{ Ksi}$$

Cálculo de esfuerzo de trabajo en base a la ecuación (51).

$$Fb = \frac{P}{A} = \frac{56256,20}{19,20} \cong 0.35 \text{ ksi}$$

$$fb \gg Fb \checkmark$$

Cálculo del índice de trabajo

$$Ia = \frac{Fb}{fb} = 0,20 \checkmark$$

**Viga secundaria = 2 canales en C de 200x80x8.**

$$P2 = P1/2 = 28128,10 \text{ lbf}$$

$$A = 8,53 \text{ in}^2$$

$$R_{min} = 2,52 \text{ in}$$

$$\text{Longitud del perfil} = 102,8 \text{ in}$$

Cálculo de la esbeltez en base a la ecuación (47)

$$\lambda = \frac{Lp}{r_{min}} = \frac{102,80}{2,52} = 40,8$$

Cálculo del esfuerzo admisible en base a la ecuación (50).

$$fb = \frac{\pi^2 * E}{\lambda^2 * Fs} = \frac{\pi^2 * (30 * 10^3 \text{ Ksi})}{(40,80)^2 * 10} = 17,78 \text{ Ksi}$$

Cálculo de esfuerzo de trabajo en base a la ecuación (51).

$$Fb = \frac{P}{A} = \frac{56256,20}{19,20} \cong 3.3 \text{ ksi}$$

$$fb \gg Fb \checkmark$$

Cálculo del índice de trabajo

$$Ia = \frac{Fb}{fb} = 0,20 \checkmark$$

### 2.3.6. Dimensionamiento de placas de conexión críticas.

Las placas son elementos versátiles que permiten interconectar elementos principales, por lo cual están sometidas a sollicitaciones mecánicas transmitidas estos elementos hacia los elementos principales, por tanto, es necesario determinar las dimensiones mínimas de las placas de conexión.

Como en otros elementos se tiene esfuerzos permisibles y esfuerzos de trabajo, de la misma manera se los calcula en las placas. Los siguientes factores fueron tomados en cuenta para el dimensionamiento de las placas

- Material seleccionado: Acero A36;  $S_y = 36$  (Ksi);  $S_{ut} = 58$  (Ksi). [13]
- Las sollicitaciones mecánicas se las determina en base a las cargas aplicadas al mecanismo, las cuales son a tensión.
- La geometría se la determino en base a los requerimientos de cada caso crítico en particular, por medio de las siguientes ecuaciones.

Para cargas de tensión, como lo muestra la "Figura 2.33".

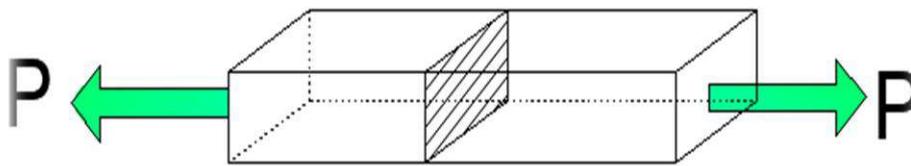


Figura 2.33.Elementos a tracción.  
[Fuente: Propia]

- Esfuerzo generado en el elemento.

$$S = \frac{P}{A} \quad \text{EC. ( 53)}$$

Dónde:  $S$  = es el esfuerzo a la tensión o a la compresión, lb/in<sup>2</sup>

$P$  = Carga aplicada o fuerza, lb

$A$  = Área de sección transversal, in<sup>2</sup>

- Carga permitida

$$Pa = A * Sa \quad \text{EC. ( 54)}$$

Donde:

Pa= Carga permitida, lb

A= Área de sección transversal, in<sup>2</sup>

Sa= Esfuerzo permitido a la tensión o la compresión, lb/in<sup>2</sup>

- Área transversal mínima requerida

$$Ar = \frac{P}{Sa} \quad \text{EC. ( 55)}$$

Donde:

Ar= Área transversal mínima requerida, in<sup>2</sup>

P= Carga aplicada al elemento, lb

- Área trasversal aplicando el factor de seguridad.

$$Ar = \frac{fs * P}{Sa} \quad \text{EC. ( 56)}$$

Donde:

fs= Factor de seguridad.

$$fs = \frac{Sa}{S} \quad \text{EC. ( 57)}$$

### 2.3.6.1. Dimensionamiento Placa principal del soporte, tren de 12 poleas, Pilona 17.

La placa de conexión del soporte de la “Figura 2.34” está ubicada entre la viga principal y soporte del tren, en total son 2 placas.

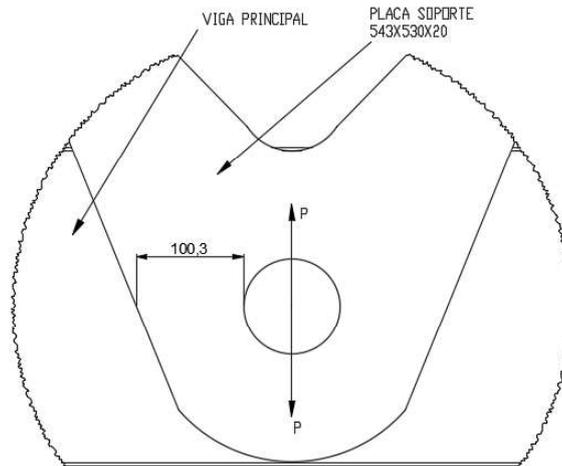


Figura 2.34. Esquema de la placa principal del soporte.  
[Fuente: Propia]

Carga total= Carga impuesta al mecanismo + Peso estructural del mecanismo.

$$PT= \text{Carga total} = 250,24 \text{ kN} = 56256,20 \text{ lb}$$

$$P= PT/2= 28128,10 \text{ lb}$$

$$Sa= Sy(A36) = 36\,000 \text{ lb/in}^2$$

El factor de seguridad no puede ser inferior a 3 Se escogió un  $fs= 4$ . Se tiene en base a la ecuación (56).

$$Ar = \frac{fs * P}{Sa} = \frac{4 * 28128,10 \text{ lb}}{36000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} = 3,13 \text{ in}^2$$

El área transversal que soporta la carga está en el eje del orificio.

Dimensiones de la placa.

$$\text{Largo efectivo} = 200,6 \text{ mm} = 7,89 \text{ in}$$

$$\text{Espesor} = 20 \text{ mm} = 0,8 \text{ in}$$

Área transversal efectiva = Largo \* espesor= **6,31 in<sup>2</sup>**

$$A_{te} > A_r \quad \checkmark$$

Las dimensiones de la placa son mayores a los requerimientos mínimos, el esfuerzo generado en la placa en base a la ecuación (51).

$$S = \frac{P}{A} = \frac{28128.1 \text{ lb}}{5 \text{ in}^2} = 4457,7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

El detalle de este elemento se encuentra en el **ANEXO 15**.

### 2.3.6.2. Dimensionamiento de placa de conexión viga principal.

Existen 4 placas de conexión, “Figura 2.35” que conecta la viga principal del tren de poleas con las vigas de los módulos de 6 de poleas.

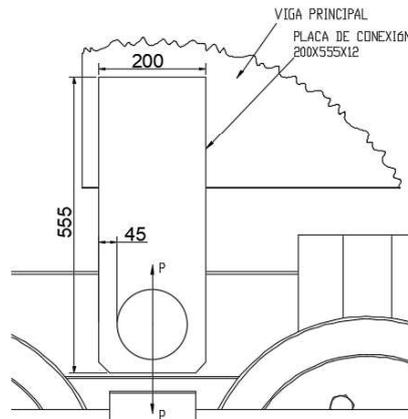


Figura 2.35. Esquema de placa de conexión principal.

[Fuente: Propia]

La carga ejercida sobre cada placa es igual a la mitad de la carga ejercida sobre el eje de 6 poleas. El área transversal que soporta la carga está en el eje del orificio.

$$P_{\text{eje}} = 122.74 \text{ kN} = 27593 \text{ lb.} = PT$$

$$P = PT/2 = 13796,50 \text{ lb.}$$

$$S_a = S_y(A36) = 36 \text{ 000 lb/in}^2 / F_s = 4$$

Se tiene en base a la ecuación (50).

$$A_r = \frac{f_s * P}{S_a} = \frac{4 * 13796,50 \text{ lb}}{36000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} = 1,53 \text{ in}^2$$

Dimensiones de la placa.

Largo efectivo = 90 mm = 3,50 in /Espesor = 12 mm = 0,50 in

Área transversal efectiva = Largo \* espesor = **1,67 in<sup>2</sup>**

$$A_{te} > A_r \quad \checkmark$$

Las dimensiones de la placa son mayores a los requerimientos mínimos, el esfuerzo generado en la placa en base a la ecuación (51).

$$S = \frac{P}{A} = \frac{13796,5 \text{ lb}}{1,67 \text{ in}^2} = 8261,38 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

El detalle de este elemento se encuentra en el **ANEXO 15**.

### 2.3.6.3. Dimensionamiento placa de izaje.

La placa de izaje, "Figura 2.36", tiene la función de facilitar el montaje, soporta el peso estructural del tren de poleas.

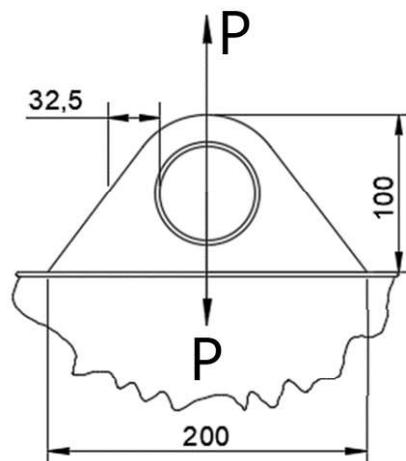


Figura 2.36. Esquema de placa de izaje.  
[Fuente: Propia]

P= Peso estructural del tren de poleas completo = 2,80 ton= 6300 lb

Sa= Sy(A36) = 36 000 lb/in<sup>2</sup>

Fs= 4

Se obtiene el área requerida en base a la ecuación (56).

$$A_r = \frac{f_s * P}{S_a} = \frac{4 * 6300 \text{ lb}}{36000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} = 0,70 \text{ in}^2$$

El área transversal que soporta la carga está en el eje del orificio.

Dimensiones de la placa.

Largo efectivo = 75 mm= 2,95 in

Espesor = 20 mm = 0,80 in

Área trasversal efectiva = Largo \* espesor= **2,36 in<sup>2</sup>**

$$A_{te} > A_r \quad \checkmark$$

Las dimensiones de la placa son mayores a los requerimientos mínimos, el esfuerzo generado en la placa en base a la ecuación (51).

$$S = \frac{P}{A} = \frac{6300 \text{ lb}}{1,67 \text{ in}^2} = 2669,50 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

El detalle de este elemento se encuentra en el **ANEXO 15**.

### 2.3.7. Conexiones Soldadas críticas.

Las conexiones de soldadura están diseñadas para resistir las cargas aplicadas sin importar el tipo de sollicitación mecánica.

Los procesos de soldadura más utilizados para producción dentro del país son GMAW y FCAW. Se eligió el proceso de soldadura FCAW. Con material de aporte E71T-1C, lo que significa que se utilizara un electrodo tubular de resistencia mínima a la tracción de 70 ksi, que pueda ser soldado en todas las posiciones, con gas de protección CO<sub>2</sub>. [19]

Es necesario definir las dimensiones mínimas que debe tener la soldadura para soportar las cargas impuestas, para ello se determina la longitud mínima que debe tener el patín de soldadura. [20]

$$Pl = \frac{P}{l_s} \quad \text{EC. ( 58)}$$

$$\sigma_a = \frac{1}{f_s} \sigma_{material} \quad \text{EC. ( 59)}$$

Donde

Pl= Carga sobre la soldadura de filete, lb.in

l<sub>s</sub>= longitud del cordón de soldadura. in

σ<sub>a</sub> = esfuerzo admisible de la soldadura, lb/in<sup>2</sup>

σ<sub>material</sub> = 70000 (lb/in<sup>2</sup>)

f<sub>s</sub>= 5, factor de seguridad.

En base las ecuaciones (41) y (42) obtenemos la longitud mínima del patín, y el esfuerzo generado en la soldadura.

$$w = \frac{Pl}{\sigma a} \quad \text{EC. ( 60)}$$

$$\sigma = \frac{P}{0.707 * hc * ls} \quad \text{EC. ( 61)}$$

Donde

w= longitud mínima del patín, in

$\sigma$  = esfuerzo que se genera en la soldadura, lb/in<sup>2</sup>

h= longitud de la garganta = 0.707 \*hc, in

hc= longitud del patín de soldadura, in

ls = longitud del cordón de soldadura, in

### 2.3.7.1. Soldadura en la placa de Izaje

La placa de Izaje, “Figura 2.37”, facilitara el montaje del tren de poleas en las pilonas, debe ser soldada en la viga principal.

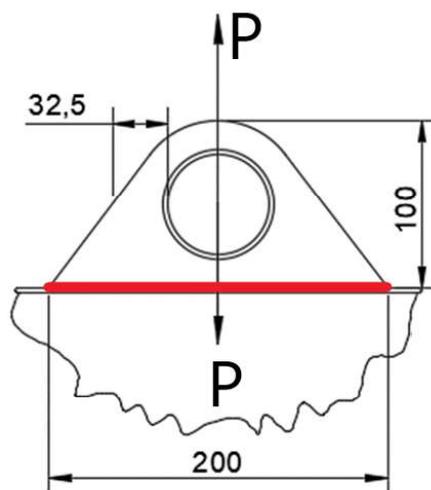


Figura 2.37. Soldadura de la placa de Izaje.  
[Fuente: Propia]

Datos iniciales para la soldadura de la placa de Izaje.

$$L_s = 440 \text{ mm} = 17,32 \text{ in}$$

$$P = \text{Carga} = 6300 \text{ lb}$$

$$\sigma_a = 70000 \text{ lb/in}^2$$

Tenemos en base a las ecuaciones (58), (59), (60), (61):

$$Pl = \frac{P}{L_s} = \frac{6300}{17,32}$$

$$Pl = 363,74 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$\sigma_a = \frac{1}{5} * 70000 = 14000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$w = \frac{363,74 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{14000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}$$

$$w = 0,03 \text{ in} \cong 1 \text{ mm}$$

$$\sigma = \frac{P}{0,707 * hc * L_s} = \frac{6300}{0,707 * 0,03 \text{ in} * 17,32 \text{ in}} = 17149,52 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$\sigma = 17149,52 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$\sigma_a > \sigma$$

El tamaño mínimo de la soldadura calculada es de 0,05 in, sin embargo, para soldar espesores de 4/5 in el tamaño mínimo de la soldadura debe ser de 1/4 in. [18].

$$w = \frac{1}{4} \text{ in} \rightarrow \text{para fines prácticos } 8 \text{ mm} .$$

$$\sigma = \frac{P}{0,707 * hc * L_s} = \frac{6300}{0,707 * 0,32 \text{ in} * 17,32 \text{ in}} = 1607,76 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$\sigma = 1607,76 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$\sigma_a > \sigma \checkmark$$

El detalle de este elemento se encuentra en el **ANEXO 15**.

### 2.3.7.2. Soldadura de placa de conexión de la viga principal.

La soldadura de la placa de conexión, “Figura 2.38”, debe ser realizada precautelando no dañar el material base.

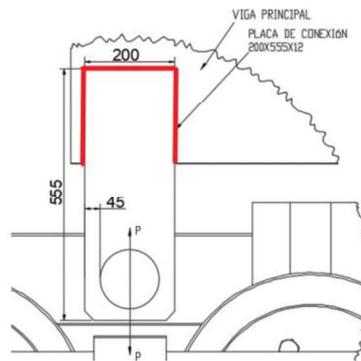


Figura 2.38. Esquema de soldadura de la placa de conexión de la viga principal  
[Fuente: Propia]

Datos iniciales para la soldadura de la placa de conexión.

PL 555X200X12 mm

Ls= 570 mm= 22.44 in

La carga que soporta la placa es la carga que soporta el eje de 6 poleas equivalente a 122.74 kN o 27593 lb, se toma la carga completa.

P= Carga = 27593 lb

$\sigma_a = 70000 \text{ lb/in}^2$

Tenemos en base a las ecuaciones (58), (59), (60), (61):

$$Pl = \frac{P}{l_s} = \frac{27593}{22.44} = 1229,63 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$
$$\sigma_a = \frac{1}{5} * 70000 = 14000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$
$$w = \frac{1229,63 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{14000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} = 0.09 \text{ in} = 2,23 \text{ mm}$$

$$\sigma = \frac{P}{0,707 * hc * ls} = \frac{27593}{0,707 * 0,09 \text{ in} * 22,44 \text{ in}} = 19324,76 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$\sigma a > \sigma$$

El tamaño mínimo de la soldadura calculada es de 0.05 in, sin embargo, para soldar espesores de “1/2 in” el tamaño mínimo de la soldadura debe ser de “3/16 in”. [18]

$$w = \frac{3}{16} \text{ in} \rightarrow \text{para fines prácticos } 5 \text{ mm}.$$

$$\sigma = \frac{P}{0,707 * hc * ls} = \frac{27593}{0,707 * 0,19 \text{ in} * 22,44 \text{ in}} = 9153,83 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$\sigma a > \sigma \quad \checkmark$$

El detalle de este elemento se encuentra en el **ANEXO 15**.

### 2.3.7.3. Soldadura de placa de conexión de la viga secundaria.

La soldadura de la placa de conexión, “Figura 2.39”, debe ser realizada precautelando no dañar el material base.

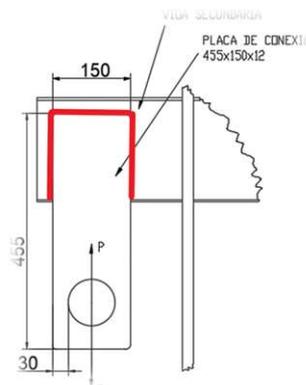


Figura 2.39. Esquema de soldadura de la placa de conexión de la viga secundaria.  
[Fuente: Propia]

Datos iniciales para la soldadura de la placa de conexión secundaria.

PL 455X150X12 mm

$L_s = 490 \text{ mm} = 19,30 \text{ in}$

La carga que soporta la placa es la carga que soporta el eje de 6 poleas equivalente a 81 kN o 18210 lb, se toma la carga completa.

$P = \text{Carga} = 18210 \text{ lb}$

$\sigma_a = 70000 \text{ lb/in}^2$

Tenemos en base a las ecuaciones (58), (59), (60), (61):

$$Pl = \frac{P}{l_s} = \frac{18210}{19.3} = 943,52 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$\sigma_a = \frac{1}{5} * 70000 = 14000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$w = \frac{1229,63 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{14000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} = 0,07 \text{ in} = 1,71 \text{ mm}$$

$$\sigma = \frac{P}{0,707 * hc * l_s} = \frac{18210}{0,707 * 0,07 \text{ in} * 19,30 \text{ in}} = 19064,92 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$\sigma_a > \sigma$$

El tamaño mínimo de la soldadura calculada es de 0,05 in, sin embargo, para soldar espesores de "1/2 in" el tamaño mínimo de la soldadura debe ser de "3/16 in". [18]

$$w = \frac{3}{16} \text{ in} \rightarrow \text{para fines prácticos } 5 \text{ mm} .$$

$$\sigma = \frac{P}{0,707 * hc * l_s} = \frac{27593}{0,707 * 0,19 \text{ in} * 22,44 \text{ in}} = 7023,92 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$\sigma_a > \sigma \quad \checkmark$$

El detalle de este elemento se encuentra en el **ANEXO 15**.

### 2.3.8. Conexiones empernadas críticas.

Los pernos son elementos de sujeción que trabajan a corte, para el diseño se seleccionó pernos A325, debido a que poseen un recubrimiento de galvanizado que previene la corrosión en los elementos, para su selección es necesario definir el área transversal y la longitud necesaria para que el perno cumpla con su función.

La conexión crítica empernada del sistema de trenes está situada en el anti-descarrilador, debido a que las cargas ejercidas en este elemento consideradas son de impacto.

$$\text{Carga de Impacto} = 4 \text{ Carga nominal} = 4 \cdot (226.62 \text{ kN}) = 906.48 \text{ (kN)}.$$

Para el tren de poleas de 12, existen 6 Antidescarriladores, "Figura 2.40". Por lo tanto, la carga que soporta cada uno es de 151.08 KN.

$$P_{ad} = P/4 = 33964.13 \text{ lb.}$$

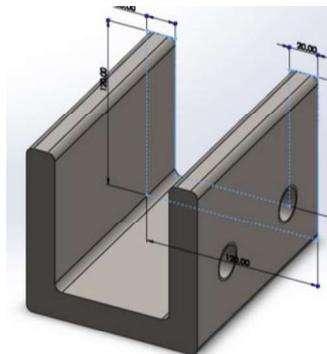


Figura 2.40. Antidescarrilador.  
[Fuente: Propia]

Proceso para determinar las dimensiones de los pernos del elemento,

Determinar la carga = P, lb

Definir la resistencia al corte del material = S<sub>sa</sub>, lb/in<sup>2</sup>

Determinar el factor de seguridad = fs

Determinar el área transversal del perno mínima = A, en base a las siguientes ecuaciones de diseño de elementos a corte. [18]

$$A = \frac{fs * P}{2 * Ssa} \quad \text{EC. ( 62)}$$

Ahora determinamos el esfuerzo generado en el perno= $S_s$ , con el área real del perno [18].

$$S_s = \frac{P}{Ar} \quad \text{EC. ( 63)}$$

Se comprueba que cumpla con el factor de seguridad [18].

$$S_s < Ssa \quad \text{EC. ( 64)}$$

Determinación de la longitud del perno, para el cálculo respectivo se tomó en consideración las dimensiones de las placas y 1/2 (in) suelta.

### 2.3.8.1. Dimensionamiento de los pernos del Anti-descarrilador.

Pernos A325

$$P = PT/2 = 33964.14/2 = 16982.07; \text{ lb.}$$

Resistencia al corte A325= 47935,67; lb/in<sup>2</sup>. [21]

F<sub>s</sub>=5.

El área transversal requerida en base a la ecuación (62).

$$A = \frac{fs * P}{2 * Ssa} = \frac{5 * 16982,07 \text{ lb}}{2 * 47935,67 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} = 0,89 \text{ in}$$

$$Ar = \text{Área real del perno} = 1 \text{ in}$$

Esfuerzo generado en base a ecuación (63).

$$S_s = \frac{P}{A_r} = \frac{16982,07 \text{ lb}}{1 \text{ in}^2} = 16982,07 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$S_s < S_{sa} \quad \checkmark$$

### 2.3.9. Conexiones con espárragos.

Los espárragos son elementos de unión que trabajan a tracción, en el sistema se han seleccionado 8 espárragos, para el soporte que ancla el tren de poleas a la pizona SAE grado 5. [22]

Poseen una resistencia mínima a la tracción de 120 ksi, están fabricados de un acero medio carbono aleado tratado térmicamente.

Esfuerzo generado en el elemento. [18]

$$S = \frac{P}{A} \quad \text{EC. ( 65)}$$

Donde:

S= es el esfuerzo a la tensión o a la compresión, lb/in<sup>2</sup>

P= Carga aplicada o fuerza, lb

A= Área de sección transversal, in<sup>2</sup>

- Carga permitida [18]

$$P_a = A * S_a \quad \text{EC. ( 66)}$$

Dónde: Pa= Carga permitida, lb

A= Área de sección transversal, in<sup>2</sup>

Sa= Esfuerzo permitido a la tensión o la compresión, lb/in<sup>2</sup>

- Área transversal mínima requerida [18]

$$Ar = \frac{P}{Sa} \quad \text{EC. ( 67)}$$

Dónde: Ar= Área transversal mínima requerida, in<sup>2</sup>

P= Carga aplicada al elemento, lb

- Área trasversal aplicando el factor de seguridad.

$$Ar = \frac{fs * P}{Sa} \quad \text{EC. ( 68)}$$

Dimensionamiento del esparrago.

PT= Carga total = 250.24 kN= 56256.2 lb

P= PT/8= 7032.03 lb

Sa= Sy (SAE grado 5) = 120 000 lb/in<sup>2</sup>

El factor de seguridad no puede ser inferior a 3. Debido a que esta junta reside la carga completa se coloca un fs= 10.

Se tiene el área mínima requerida en base a la ecuación (66) del esparrago.

$$Ar = \frac{fs * P}{Sa} = \frac{10 * 7032,05 \text{ lb}}{120000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}} = 0,59 \text{ in}^2$$

El área transversal que soporta la carga está en el eje del orificio.

Dimensiones del esparrago seleccionado.

Área trasversal efectiva = **1 in<sup>2</sup>**

$$A_{te} > A_r \quad \checkmark$$

El esfuerzo generado real en el esparrago en base a la ecuación (65).

$$S = \frac{P}{A} = \frac{7032,05 \text{ lb}}{1 \text{ in}^2} = 7032,05 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$
$$S \ll S_a \quad \checkmark$$

El detalle de este elemento se encuentra en el **ANEXO 15**.

## **2.4. Desagregación tecnológica.**

Este estudio muestra la capacidad que tiene la industria ecuatoriana para manufacturar y fabricar cada uno de los elementos que forman parte de las distintas tipologías de trenes de poleas que se utilizan dentro del presente proyecto. Uno de los principales objetivos de este estudio técnico era el desarrollar cada uno de los productos, mediante la utilización de la tecnología que poseen las distintas compañías industriales de Ecuador, en base a los procesos de producción mecánica que conlleva la transformación del material para la obtención final de los elementos y que cumplan con los requerimientos técnicos mínimos con el fin de brindar la seguridad necesaria durante la operación de cada uno de los mecanismos.

El diseño se lo ha realizado de manera modular, con el fin de adaptar subconjuntos del mecanismo dentro de otro, es por eso por lo que se detalla a continuación una descripción de los principales proveedores de productos y materia prima (PPMP) y proveedores de servicios de los procesos de producción mecánica (PI), como lo

muestra la “Tabla 24” y la “Tabla 25”, que se utilizarán para la construcción de los elementos constituyentes de los trenes de poleas.

Tabla 24. Procesos de fabricación y proveedores de servicio

<b>CÓDIGO</b>	<b>NOMBRE DEL PROCESO</b>	<b>PROVEEDORES DE SERVICIOS</b>
PI-001	Oxicorte	SEDEMI KUBIEC NOVACERO PROMEC
PI-002	Corte	SEDEMI KUBIEC NOVACERO PROMEC
PI-003	Soldadura	SEDEMI KUBIEC NOVACERO PROMEC
PI-004	Mecanizado	SEDEMI PROMEC
PI-005	Corte	SEDEMI KUBIEC NOVACERO PROMEC
PI-006	Galvanizado	GALVANORTE IDEAL ALAMBREC
PI-007	Doblado	SEDEMI KUBIEC NOVACERO PROMEC
PI-008	Perforado	SEDEMI KUBIEC NOVACERO PROMEC
PI-009	Biselado	SEDEMI KUBIEC NOVACERO PROMEC
PI-010	Fundición	FUNDIRECICLAR FUNDICIONES JCR

[Fuente: Propia]

Tabla 25. Proveedores de Materia prima

<b>CÓDIGO</b>	<b>NOMBRE DE LA MATERIA PRIMA</b>	<b>PROVEEDORES DE MATERIA PRIMA</b>
PPMP-001	Planchas 2440x1220x8 Acero ASTM A36	IPAC FERRO TORRE S.A. DIPAC
PPMP-002	Planchas 2440x1220x10 Acero ASTM A36	IPAC FERRO TORRE S.A. DIPAC
PPMP-003	Planchas 2440x1220x14 Acero ASTM A36	IPAC FERRO TORRE S.A. DIPAC
PPMP-004	Planchas 2440x1220x20 Acero ASTM A36	IPAC FERRO TORRE S.A. DIPAC
PPMP-005	Tubería estructural tipo C 300x120x12	DIPAC
PPMP-006	Tubería estructural tipo C 200x80x8	DIPAC
PPMP-007	Barra perforada Acero ASTM A381	IVAN BOHMAN
PPMP-008	Ejes de acero AISI 4340	DIPAC
PPMP-009	Ejes de acero AISI 304	DIPAC
PPMP-010	Rodamientos	CASA DEL RULIMAN PALACIO DEL RULIMAN
PPMP-011	Anillos de sujeción	CASA DEL RULIMAN PALACIO DEL RULIMAN
PPMP-012	Racores de lubricación	CASTILLO HNOS.
PPMP-013	Elastómeros para poleas	CAUCHOS VIKINGO CUCASA
PPMP-014	Pernos	CASTILLO HNOS. PALACIO DEL PERNO
PPMP-015	Tuercas	CASTILLO HNOS. PALACIO DEL PERNO
PPMP-016	Espárragos	CASTILLO HNOS. PALACIO DEL PERNO
PPMP-017	Aluminio para fundición	FUNDIRECICLAR FUNDICIONES JCR

PPMP-018	Resortes	MULTIRESORTES LA CASA DEL RESORTE
PPMP-019	Planchas 2440x1220x12 Acero ASTM A36	IPAC FERRO TORRE S.A. DIPAC

[Fuente: Propia]

### 2.4.1. Polea

En la “Tabla 26” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación de la polea. La “Figura 2.41” muestra un esquema de este elemento.

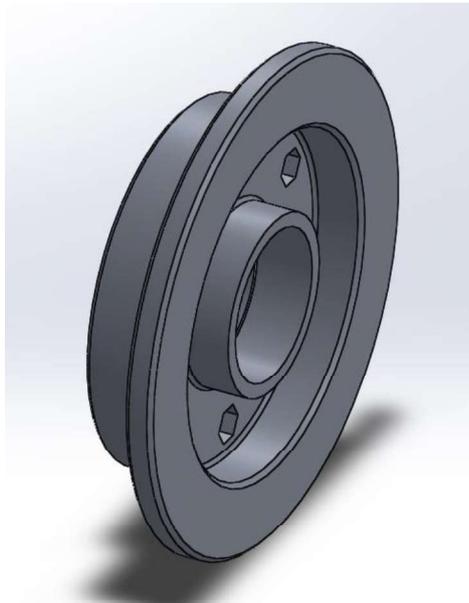


Figura 2.41. Polea  
[Fuente: Propia]

Tabla 26. Descripción polea

<b>ELEMENTO</b>	Polea
<b>MATERIALES</b>	Aluminio para fundición (PPMP-017)
<b>PROCESOS</b>	Fundición (PI-010 PI-004)

[Fuente: Propia]

### 2.4.2. Tapa de la polea

En la “Tabla 27” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación del elemento. La “Figura 2.42” muestra un esquema de este elemento.

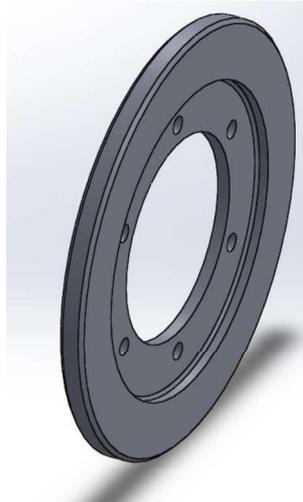


Figura 2.42. Tapa Polea  
[Fuente: Propia]

Tabla 27. Descripción tapa polea

<b>ELEMENTO</b>	Tapa polea
<b>MATERIALES</b>	Aluminio para fundición (PPMP-017)
<b>PROCESOS</b>	Fundición (PI-010) Mecanizado (PI-004)

[Fuente: Propia]

### 2.4.3. Placa par de poleas

En la “Tabla 28” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación del elemento. La “Figura 2.43” muestra un esquema de este elemento.

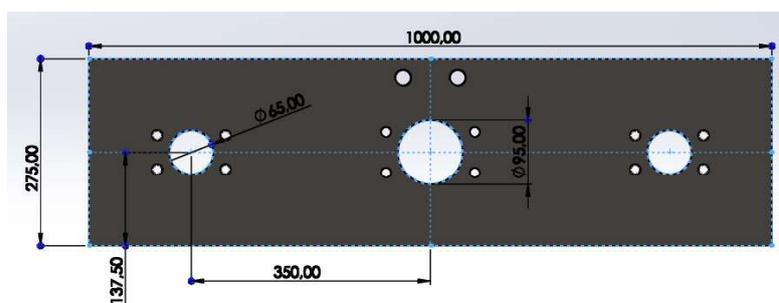


Figura 2.43. Placa par de poleas.  
[Fuente: Propia]

Tabla 28. Descripción placa par de poleas

<b>ELEMENTO</b>	Placa par de poleas
<b>MATERIALES</b>	Planchas 2440x1220x8 Acero ASTM A36 (PPMP-001)
<b>PROCESOS</b>	Corte (PI-005) Mecanizado (PI-004) Biselado (PI-009) Galvanizado (PI-006)

[Fuente: Propia]

#### 2.4.4. Placa de conexión de 4 poleas

En la “Tabla 29” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación del elemento. La “Figura 2.44” muestra un esquema de este elemento.

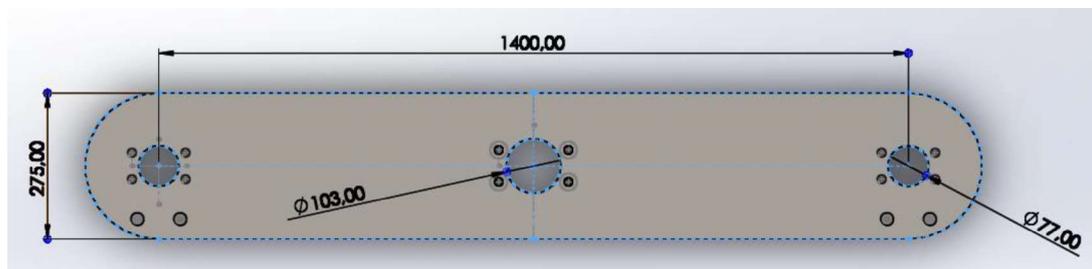


Figura 2.44. Placa de conexión-4 poleas  
[Fuente: Propia]

Tabla 29. Descripción placa 4 poleas

<b>ELEMENTO</b>	Placa 4 poleas
<b>MATERIALES</b>	Planchas 2440x1220x8 Acero ASTM A36 (PPMP-001)
<b>PROCESOS</b>	Oxicorte (PI-001) Mecanizado (PI-004) Biselado (PI-009) Galvanizado (PI-006)

[Fuente: Propia]

### 2.4.5. Bocín

En la “Tabla 30” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación, se tiene de forma esquemática el elemento en la “Figura 2.45”.



Figura 2.45. Bocines.  
[Fuente: Propia]

Tabla 30. Descripción bocines

<b>ELEMENTO</b>	Bocines
<b>MATERIALES</b>	Barra perforada Acero ASTM A381 (PPMP-007)
<b>PROCESOS</b>	Mecanizado (PI-004) Galvanizado (PI-006)

[Fuente: Propia]

### 2.4.6. Eje tipo 1

En la “Tabla 31” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación, se tiene de forma esquemática el elemento en la “Figura 2.46”.



Figura 2.46. Eje tipo 1.  
[Fuente: Propia]

Tabla 31. Descripción ejes tipo 1

<b>ELEMENTO</b>	Ejes tipo 1
<b>MATERIALES</b>	Ejes de acero AISI 4340 (PPMP-008)
<b>PROCESOS</b>	Mecanizado (PI-004) Galvanizado (PI-006)

[Fuente: Propia]

### 2.4.7. Eje tipo 2

En la “Tabla 32” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación, se tiene de forma esquemática el elemento en la “Figura 2.47”.

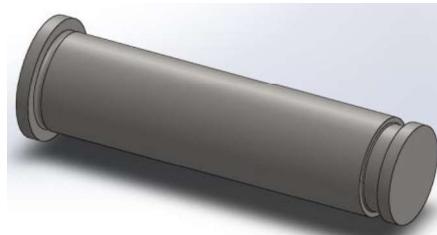


Figura 2.47. Eje Tipo 2.  
[Fuente: Propia]

Tabla 32. Descripción ejes tipo 2

<b>ELEMENTO</b>	Ejes tipo 2
<b>MATERIALES</b>	Ejes de acero AISI 304 (PPMP-009)
<b>PROCESOS</b>	Mecanizado (PI-004)

[Fuente: Propia]

### 2.4.8. Antidescarrilador

En la “Tabla 33” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación, se tiene de forma esquemática el elemento en la “Figura 2.48”.

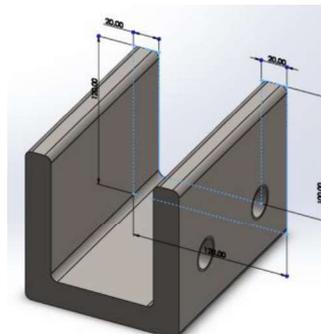


Figura 2.48. Antidescarrilador.  
[Fuente: Propia]

Tabla 33. Descripción antidescarrilador

<b>ELEMENTO</b>	Antidescarrilador
<b>MATERIALES</b>	Planchas 2440x1220x20 Acero ASTM A36 (PPMP-004)
<b>PROCESOS</b>	Oxicorte (PI-001) Doblado (PI-007) Mecanizado (PI-004) Galvanizado (PI-006)

[Fuente: Propia]

#### 2.4.9. Chapa guía del cable

En la “Tabla 34” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación, se tiene de forma esquemática el elemento en la “Figura 2.49”.

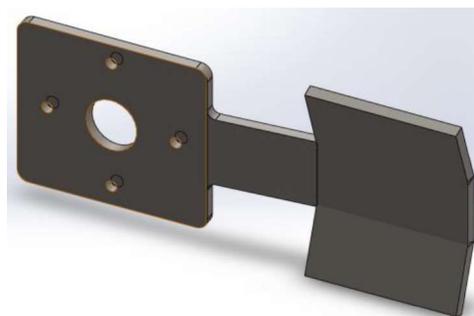


Figura 2.49. Chapa guía del cable.  
[Fuente: Propia]

Tabla 34. Descripción chapa guía de cable

<b>ELEMENTO</b>	Chapa guía de cable
<b>MATERIALES</b>	Planchas 2440x1220x14 Acero ASTM A36 (PPMP-003)
<b>PROCESOS</b>	Oxicorte (PI-001) Doblado (PI-007) Mecanizado (PI-004) Biselado (PI-009) Galvanizado (PI-006)

[Fuente: Propia]

#### 2.4.10. Topes Anti-rotación

En la “Tabla 35” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación, se tiene de forma esquemática el elemento en la “Figura 2.50”.

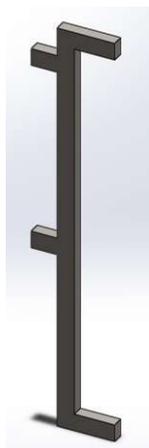


Figura 2.50. Topes Anti-rotación.  
[Fuente: Propia]

Tabla 35. Descripción tope anti-rotación

<b>ELEMENTO</b>	Topes anti-rotación
<b>MATERIALES</b>	Planchas 2440x1220x20 Acero ASTM A36 (PPMP-004)
<b>PROCESOS</b>	Oxicorte (PI-001) Mecanizado (PI-004) Biselado (PI-009) Galvanizado (PI-006)

[Fuente: Propia]

### 2.4.11. Viga principal

En la “Tabla 36” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación, se tiene de forma esquemática el elemento en la “Figura 2.51”.

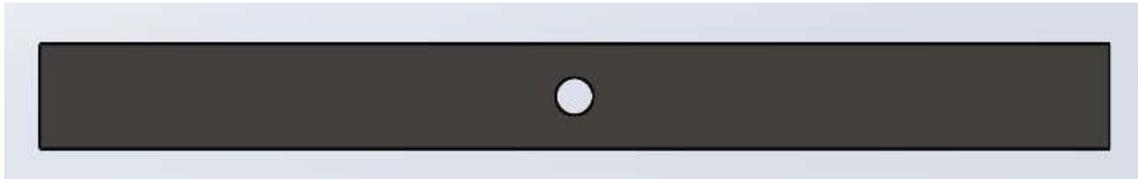


Figura 2.51. Viga principal  
[Fuente: Propia]

Tabla 36. Descripción vigas principales

<b>ELEMENTO</b>	Viga principal
<b>MATERIALES</b>	Tubería estructural tipo C 300x120x12- A36 (PPMP-005)
<b>PROCESOS</b>	Corte (PI-002) Perforado (PI-008) Biselado (PI-009) Soldadura (PI-003) Galvanizado (PI-006)

[Fuente: Propia]

### 2.4.12. Placas especiales

En la “Tabla 37” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación, se tiene de forma esquemática el elemento en la “Figura 2.52”.



Figura 2.52. Placas especiales.  
[Fuente: Propia]

Tabla 37. Descripción placas especiales

<b>ELEMENTO</b>	Placas especiales
<b>MATERIALES</b>	Planchas 2440x1220x12 Acero ASTM A36 (PPMP-019)
<b>PROCESOS</b>	Oxicorte (PI-001) Mecanizado (PI-004) Biselado (PI-009) Galvanizado (PI-006)

[Fuente: Propia]

### 2.4.13. Soporte

En la “Tabla 38” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación, se tiene de forma esquemática el elemento en la “Figura 2.53”.

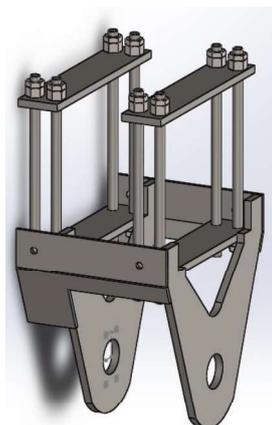


Figura 2.53. Soporte.  
[Fuente: Propia]

Tabla 38. Descripción soporte

<b>ELEMENTO</b>	Soporte
<b>MATERIALES</b>	Planchas 2440x1220x20 Acero ASTM A36 (PPMP-004) Espárragos (PPMP-016) Tuercas (PPMP-015)
<b>PROCESOS</b>	Oxicorte (PI-001) Doblado (PI-007) Mecanizado (PI-004) Biselado (PI-009) Soldadura (PI-003) Galvanizado (PI-006)

[Fuente: Propia]

#### 2.4.14. Placa de Izaje

En la “Tabla 39” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación, se tiene de forma esquemática el elemento en la “Figura 2.54”.

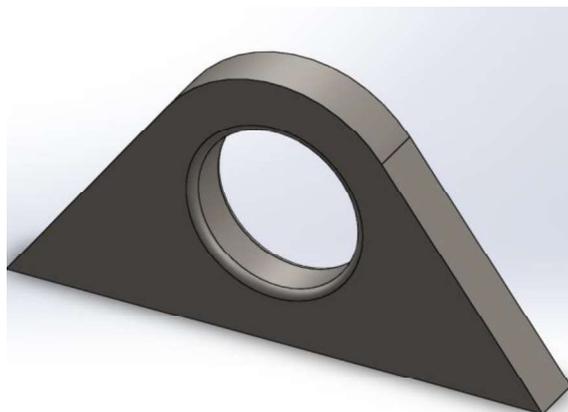


Figura 2.54. Placa de Izaje  
[Fuente: Propia]

Tabla 39.Descripción izaje

<b>ELEMENTO</b>	Izaje
<b>MATERIALES</b>	Planchas 2440x1220x20 Acero ASTM A36 (PPMP-004)
<b>PROCESOS</b>	Oxicorte (PI-001) Mecanizado (PI-004) Biselado (PI-009) Galvanizado (PI-006)

[Fuente: Propia]

#### 2.4.15. Viga Secundaria

En la “Tabla 40” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación, se tiene de forma esquemática el elemento en la “Figura 2.55”.

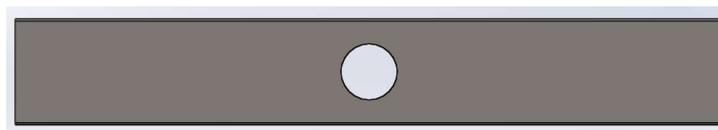


Figura 2.55. Vigas secundarias.  
[Fuente: Propia]

Tabla 40. Descripción vigas secundarias

<b>ELEMENTO</b>	Izaje
<b>MATERIALES</b>	Tubería estructural tipo C 200x80x8 (PPMP-006)
<b>PROCESOS</b>	Corte (PI-002) Perforado (PI-008) Biselado (PI-009) Soldadura (PI-003) Galvanizado (PI-006)

[Fuente: Propia]

#### 2.4.16. Placa del tren mixto

En la “Tabla 41” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación, se tiene de forma esquemática el elemento en la “Figura 2.56”.

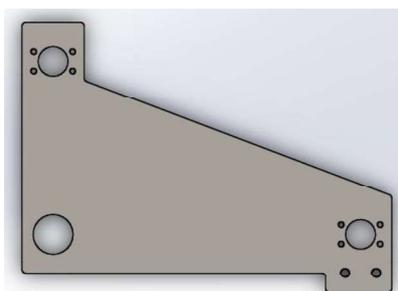


Figura 2.56. Placas del tren Mixto.  
[Fuente: Propia]

Tabla 41. Descripción placas tren mixto

<b>ELEMENTO</b>	Placas especiales
<b>MATERIALES</b>	Planchas 2440x1220x12 Acero ASTM A36 (PPMP-019)
<b>PROCESOS</b>	Oxicorte (PI-001) Mecanizado (PI-004) Biselado (PI-009) Galvanizado (PI-006)

[Fuente: Propia]

#### 2.4.17. Soporte tren Mixto

En la “Tabla 42” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación, se tiene de forma esquemática el elemento en la “Figura 2.57”.

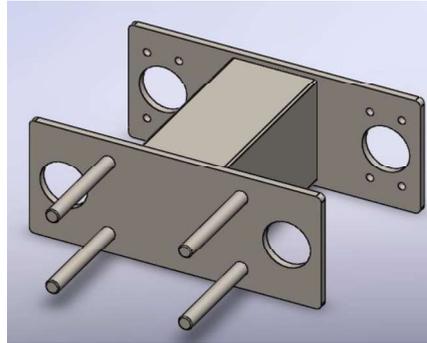


Figura 2.57. Soporte tren mixto.  
[Fuente: Propia]

Tabla 42. Descripción soporte tren mixto

<b>ELEMENTO</b>	Soporte tren mixto
<b>MATERIALES</b>	Planchas 2440x1220x20 Acero ASTM A36 (PPMP-004) Tubería estructural tipo C 200x80x8 (PPMP-006) Espárragos (PPMP-016)
<b>PROCESOS</b>	Oxicorte (PI-001) Mecanizado (PI-004) Biselado (PI-009) Soldadura (PI-003) Galvanizado (PI-006)

[Fuente: Propia]

#### 2.4.18. Placa retenedora.

En la “Tabla 43” se encuentra la descripción de proveedores de materiales y los procesos para la fabricación, se tiene de forma esquemática el elemento en la “Figura 2.58”.

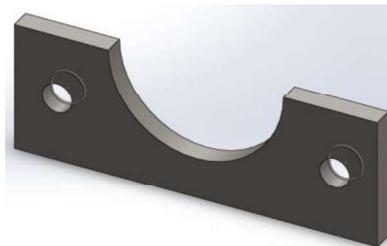


Figura 2.58. Placas retenedoras.  
[Fuente: Propia]

Tabla 43. Descripción placas retenedoras

<b>ELEMENTO</b>	Placas retenedoras
<b>MATERIALES</b>	Planchas 2440x1220x10 Acero ASTM A36 (PPMP-002)
<b>PROCESOS</b>	Oxicorte (PI-001) Mecanizado (PI-004) Biselado (PI-009) Galvanizado (PI-006)

[Fuente: Propia]

## **2.5. Ingeniería de costos.**

La ingeniería de costos es un estudio que permitió pronosticar y establecer los costos para la obtención de un producto final, en base al análisis de los procesos involucrados para la transformación de la materia prima.

Partiendo del estudio de desagregación tecnológica del presente proyecto, en el cual se muestran a los principales proveedores de materias primas y servicios existentes en la industria ecuatoriana, se pudo conocer la modalidad de desarrollo de cotizaciones para la ejecución de proyectos, la cual consiste en definir un costo referencial en relación con el peso de material producido y los procesos que se requieren su transformación.

La matriz de análisis de precios unitarios (APU) es una herramienta que contempla a equipos, mano de obra, materiales y transporte para la ejecución de un proyecto, tomando en cuenta al precio unitario por unidad de medida.

En este caso se han definido los siguientes rubros para la obtención del respectivo producto final:

Suministro, fabricación y ensamble de tren de 8 poleas a compresión, Tabla 44.

Suministro, fabricación y ensamble de tren de 10 poleas a compresión, Tabla 45.

Suministro, fabricación y ensamble de tren de 12 poleas a compresión, Tabla 46.

Suministro, fabricación y ensamble de tren de 8 poleas a tracción, Tabla 47.

Suministro, fabricación y ensamble de tren de 10 poleas a tracción, Tabla 48.

Suministro, fabricación y ensamble de tren de 12 poleas a tracción, Tabla 49.

Suministro, fabricación y ensamble de tren de poleas mixto, Tabla 50.

Tabla 44. Análisis de precio unitario del suministro, fabricación y ensamble de tren de 8 poleas a compresión.

<b>RUBRO:</b> Suministro, fabricación y ensamble de tren de 8 poleas a compresión	<b>UNIDAD:</b>	U
<b>DESCRIPCION:</b> Peso total del mecanismo igual 1,65 TON.	<b>CÓDIGO:</b>	QC-TP-8C-001

EQUIPOS							
CODIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C/R	PRT (%)
	<b>SUBTOTAL EQUIPOS</b>					<b>0</b>	<b>0</b>

MANO DE OBRA							
CODIGO	DESCRIPCIÓN (CATEGORÍA)	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C*R	PRT (%)
	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>0</b>	<b>0</b>

MATERIALES							
CODIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=A*B	PRT (%)	
MAT-1	ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36	KGR	832,60	4,39	3.655,11	16,15	
MAT-2	ACERO AISI 4340	KGR	83,4	4,37	364,46	1,61	
MAT-3	ACERO ASTM A381	KGR	39,6	8,77	347,29	1,53	
MAT-4	ACERO AISI 304	KGR	97,2	7,66	744,55	3,29	
MAT-5	RODAMIENTOS NU2315	U	16	424,48	6.791,68	30,01	
MAT-6	ANILLOS DE RETENCIÓN	U	16	2,38	38,08	0,17	
MAT-7	PERNOS	KGR	23,4	4,82	112,79	0,50	
MAT-8	TUERCAS	KGR	14	6,04	84,56	0,37	
MAT-9	RACOR SENCILLO DE LUBRICACIÓN 5/8"	U	8	1,53	12,24	0,05	
MAT-10	POLEA DIÁM. 520	U	8	523,85	4.190,80	18,52	
MAT-11	TAPA POLEA DIÁM. 520	U	8	215,34	1.722,72	7,61	
MAT-12	ESPARRAGOS	U	8	12,42	99,36	0,44	
MAT-13	ELASTOMERO DIÁM. 520	U	8	558	4.464,00	19,73	
	<b>SUBTOTAL MATERIALES</b>				<b>22.627,64</b>	<b>100,00</b>	

TRANSPORTE						
CODIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=A*B	PRT (%)
	<b>SUBTOTAL TRANSPORTE</b>				<b>0</b>	<b>0</b>

<b>TOTAL, COSTO DIRECTO</b>	<b>22.627,64</b>
<b>INDIRECTOS Y UTILIDADES (15%)</b>	<b>3.394,15</b>
<b>VALOR OFERTADO</b>	<b>26.021,79</b>

[Fuente: Propia]

Tabla 45. Análisis de precio unitario del suministro, fabricación y ensamble de tren de 10 poleas a compresión.

<b>RUBRO:</b> Suministro, fabricación y ensamble de tren de 10 poleas a compresión	<b>UNIDAD:</b>	U
<b>DESCRIPCIÓN:</b> Peso total del mecanismo igual 2,3 TON.	<b>CÓDIGO:</b>	QC-TP-10C-002

EQUIPOS							
CODIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C/R	PRT (%)
	<b>SUBTOTAL EQUIPOS</b>					<b>0</b>	<b>0</b>

MANO DE OBRA							
CODIGO	DESCRIPCIÓN (CATEGORÍA)	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C*R	PRT (%)
	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>0</b>	<b>0</b>

MATERIALES							
CODIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=A*B	PRT (%)	
MAT-1	ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36	KGR	1.205,90	4,39	5.293,90	17,93	
MAT-2	ACERO AISI 4340	KGR	210,6	4,37	920,32	3,12	
MAT-3	ACERO ASTM A381	KGR	58	8,77	508,66	1,72	
MAT-4	ACERO AISI 304	KGR	121,5	7,66	930,69	3,15	
MAT-5	RODAMIENTOS NU2315	U	20	424,48	8.489,60	28,76	
MAT-6	ANILLOS DE RETENCIÓN	U	20	2,38	47,60	0,16	
MAT-7	PERNOS	KGR	30,7	4,82	147,97	0,50	
MAT-8	TUERCAS	KGR	16,2	6,04	97,85	0,33	
MAT-9	RACOR SENCILLO DE LUBRICACIÓN 5/8"	U	10	1,53	15,30	0,05	
MAT-10	POLEA DIÁM. 520	U	10	523,85	5.238,50	17,74	
MAT-11	TAPA POLEA DIÁM. 520	U	10	215,34	2.153,40	7,29	
MAT-12	ESPARRAGOS	U	8	12,42	99,36	0,34	
MAT-13	ELASTOMERO DIÁM. 520	U	10	558	5.580,00	18,90	
	<b>SUBTOTAL MATERIALES</b>				<b>29.523,16</b>	<b>100,00</b>	

TRANSPORTE						
CODIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=A*B	PRT (%)
	<b>SUBTOTAL TRANSPORTE</b>				<b>0</b>	<b>0</b>

<b>TOTAL, COSTO DIRECTO</b>	<b>29.523,16</b>
<b>INDIRECTOS Y UTILIDADES (15%)</b>	<b>4.428,47</b>
<b>VALOR OFERTADO</b>	<b>33.951,63</b>

[Fuente: Propia]

Tabla 46. Análisis de precio unitario del suministro, fabricación y ensamble de tren de 12 poleas a compresión.

<b>RUBRO:</b> Suministro, fabricación y ensamble de tren de 12 poleas a compresión	<b>UNIDAD:</b>	U
<b>DESCRIPCION:</b> Peso total del mecanismo igual 2,7 TON.	<b>CÓDIGO:</b>	QC-TP-12C-003

EQUIPOS							
CODIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	RENDIMIENTO	COSTO	PRT (%)
O		D	B	HORA	O	D=C/R	
		A		C=A*B	R		
	<b>SUBTOTAL EQUIPOS</b>					<b>0</b>	<b>0</b>

MANO DE OBRA							
CODIGO	DESCRIPCIÓN (CATEGORÍA)	CANTIDAD	JORNAL/H	COSTO	RENDIMIENTO	COSTO	PRT (%)
O		D	R	HORA	O	D=C*R	
		A	B	C=A*B	R		
	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>0</b>	<b>0</b>

MATERIALES						
CODIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	COSTO	PRT (%)
O			A	B	C=A*B	
MAT-1	ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36	KGR	1.329,60	4,39	5.836,94	16,78
MAT-2	ACERO AISI 4340	KGR	242,4	4,37	1.059,29	3,04
MAT-3	ACERO ASTM A381	KGR	63,6	8,77	557,77	1,60
MAT-4	ACERO AISI 304	KGR	145,8	7,66	1.116,83	3,21
MAT-5	RODAMIENTOS NU2315	U	24	424,48	10.187,52	29,28
MAT-6	ANILLOS DE RETENCIÓN	U	24	2,38	57,12	0,16
MAT-7	PERNOS	KGR	36	4,82	173,52	0,50
MAT-8	TUERCAS	KGR	20	6,04	120,80	0,35
MAT-9	RACOR SENCILLO DE LUBRICACIÓN 5/8"	U	12	1,53	18,36	0,05
MAT-10	POLEA DIÁM. 520	U	12	523,85	6.286,20	18,07
MAT-11	TAPA POLEA DIÁM. 520	U	12	215,34	2.584,08	7,43
MAT-12	ESPARRAGOS	U	8	12,42	99,36	0,29
MAT-13	ELASTOMERO DIÁM. 520	U	12	558	6.696,00	19,24
	<b>SUBTOTAL MATERIALES</b>				<b>34.793,79</b>	<b>100,00</b>

TRANSPORTE						
CODIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	PRT (%)
O			A	B	C=A*B	
	<b>SUBTOTAL TRANSPORTE</b>				<b>0</b>	<b>0</b>

<b>TOTAL, COSTO DIRECTO</b>	<b>34.793,79</b>
<b>INDIRECTOS Y UTILIDADES (15%)</b>	<b>5.219,07</b>
<b>VALOR OFERTADO</b>	<b>40.012,86</b>

[Fuente: Propia]

Tabla 47. Análisis de precio unitario del suministro, fabricación y ensamble de tren de 8 poleas a tracción.

<b>RUBRO:</b> Suministro, fabricación y ensamble de tren de 8 poleas a tracción	<b>UNIDAD:</b>	U
<b>DESCRIPCIÓN:</b> Peso total del mecanismo igual 1,78 TON.	<b>CÓDIGO:</b>	QC-TP-8T-004

EQUIPOS							
CODIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C/R	PRT (%)
	<b>SUBTOTAL EQUIPOS</b>					<b>0</b>	<b>0</b>

MANO DE OBRA							
CODIGO	DESCRIPCIÓN (CATEGORÍA)	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C*R	PRT (%)
	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>0</b>	<b>0</b>

MATERIALES							
CODIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=A*B	PRT (%)	
MAT-1	ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36	KGR	870,60	4,39	3.821,93	15,67	
MAT-2	ACERO AISI 4340	KGR	83,4	4,37	364,46	1,49	
MAT-3	ACERO ASTM A381	KGR	39,6	8,77	347,29	1,42	
MAT-4	ACERO AISI 304	KGR	97,2	7,66	744,55	3,05	
MAT-5	RODAMIENTOS NU2315	U	16	424,48	6.791,68	27,84	
MAT-6	ANILLOS DE RETENCIÓN	U	16	2,38	38,08	0,16	
MAT-7	PERNOS	KGR	23,4	4,82	112,79	0,46	
MAT-8	TUERCAS	KGR	14	6,04	84,56	0,35	
MAT-9	RACOR SENCILLO DE LUBRICACIÓN 5/8"	U	8	1,53	12,24	0,05	
MAT-10	POLEA DIÁM. 620	U	8	625,75	5.006,00	20,52	
MAT-11	TAPA POLEA DIÁM. 620	U	8	255,6	2.044,80	8,38	
MAT-12	ESPARRAGOS	U	8	12,42	99,36	0,41	
MAT-13	ELASTOMERO DIÁM. 520	U	8	616	4.928,00	20,20	
	<b>SUBTOTAL MATERIALES</b>				<b>24.395,74</b>	<b>100,00</b>	

TRANSPORTE							
CODIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=A*B	PRT (%)	
	<b>SUBTOTAL TRANSPORTE</b>				<b>0</b>	<b>0</b>	

<b>TOTAL, COSTO DIRECTO</b>	<b>24.395,74</b>
<b>INDIRECTOS Y UTILIDADES (15%)</b>	<b>3.659,36</b>
<b>VALOR OFERTADO</b>	<b>28.055,11</b>

[Fuente: Propia]

Tabla 48. Análisis de precio unitario del suministro, fabricación y ensamble de tren de 10 poleas a tracción.

<b>RUBRO:</b> Suministro, fabricación y ensamble de tren de 10 poleas a tracción	<b>UNIDAD:</b>	U
<b>DESCRIPCIÓN:</b> Peso total del mecanismo igual 2,5 TON.	<b>CÓDIGO:</b>	QC-TP-10T-005

EQUIPOS							
CODIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C/R	PRT (%)
	<b>SUBTOTAL EQUIPOS</b>					<b>0</b>	<b>0</b>

MANO DE OBRA							
CODIGO	DESCRIPCIÓN (CATEGORÍA)	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C*R	PRT (%)
	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>0</b>	<b>0</b>

MATERIALES							
CODIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=A*B	PRT (%)	
MAT-1	ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36	KGR	1.275,90	4,39	5.601,20	17,60	
MAT-2	ACERO AISI 4340	KGR	210,6	4,37	920,32	2,89	
MAT-3	ACERO ASTM A381	KGR	58	8,77	508,66	1,60	
MAT-4	ACERO AISI 304	KGR	121,5	7,66	930,69	2,92	
MAT-5	RODAMIENTOS NU2315	U	20	424,48	8.489,60	26,67	
MAT-6	ANILLOS DE RETENCIÓN	U	20	2,38	47,60	0,15	
MAT-7	PERNOS	KGR	30,7	4,82	147,97	0,46	
MAT-8	TUERCAS	KGR	16,2	6,04	97,85	0,31	
MAT-9	RACOR SENCILLO DE LUBRICACIÓN 5/8"	U	10	1,53	15,30	0,05	
MAT-10	POLEA DIÁM. 620	U	10	625,75	6.257,50	19,66	
MAT-11	TAPA POLEA DIÁM. 620	U	10	255,6	2.556,00	8,03	
MAT-12	ESPARRAGOS	U	8	12,42	99,36	0,31	
MAT-13	ELASTOMERO DIÁM. 520	U	10	616	6.160,00	19,35	
	<b>SUBTOTAL MATERIALES</b>				<b>31.832,06</b>	<b>100,00</b>	

TRANSPORTE							
CODIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=A*B	PRT (%)	
	<b>SUBTOTAL TRANSPORTE</b>				<b>0</b>	<b>0</b>	

<b>TOTAL, COSTO DIRECTO</b>	<b>31.832,06</b>
<b>INDIRECTOS Y UTILIDADES (15%)</b>	<b>4.774,81</b>
<b>VALOR OFERTADO</b>	<b>36.606,86</b>

[Fuente: Propia]

Tabla 49. Análisis de precio unitario del suministro, fabricación y ensamble de tren de 12 poleas a tracción.

<b>RUBRO:</b> Suministro, fabricación y ensamble de tren de 12 poleas a tracción	<b>UNIDAD:</b>	U
<b>DESCRIPCIÓN:</b> Peso total del mecanismo igual 2,8 TON.	<b>CÓDIGO:</b>	QC-TP-12T-006

EQUIPOS							
CODIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C/R	PRT (%)
	<b>SUBTOTAL EQUIPOS</b>					<b>0</b>	<b>0</b>

MANO DE OBRA							
CODIGO	DESCRIPCIÓN (CATEGORÍA)	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C*R	PRT (%)
	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>0</b>	<b>0</b>

MATERIALES							
CODIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=A*B	PRT (%)	
MAT-1	ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36	KGR	1.399,60	4,39	6.144,24	16,38	
MAT-2	ACERO AISI 4340	KGR	242,4	4,37	1.059,29	2,82	
MAT-3	ACERO ASTM A381	KGR	63,6	8,77	557,77	1,49	
MAT-4	ACERO AISI 304	KGR	145,8	7,66	1.116,83	2,98	
MAT-5	RODAMIENTOS NU2315	U	24	424,48	10.187,52	27,16	
MAT-6	ANILLOS DE RETENCIÓN	U	24	2,38	57,12	0,15	
MAT-7	PERNOS	KGR	36	4,82	173,52	0,46	
MAT-8	TUERCAS	KGR	20	6,04	120,80	0,32	
MAT-9	RACOR SENCILLO DE LUBRICACIÓN 5/8"	U	12	1,53	18,36	0,05	
MAT-10	POLEA DIÁM. 620	U	12	625,75	7.509,00	20,02	
MAT-11	TAPA POLEA DIÁM. 620	U	12	255,6	3.067,20	8,18	
MAT-12	ESPARRAGOS	U	8	12,42	99,36	0,26	
MAT-13	ELASTOMERO DIÁM. 520	U	12	616	7.392,00	19,71	
	<b>SUBTOTAL MATERIALES</b>				<b>37.503,01</b>	<b>100,00</b>	

TRANSPORTE							
CODIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=A*B	PRT (%)	
	<b>SUBTOTAL TRANSPORTE</b>				<b>0</b>	<b>0</b>	

<b>TOTAL, COSTO DIRECTO</b>	<b>37.503,01</b>
<b>INDIRECTOS Y UTILIDADES (15%)</b>	<b>5.625,45</b>
<b>VALOR OFERTADO</b>	<b>43.128,46</b>

[Fuente: Propia]

Tabla 50. Análisis de precio unitario del suministro, fabricación y ensamble de tren mixto de poleas.

<b>RUBRO:</b> Suministro, fabricación y ensamble de tren mixto de poleas.	<b>UNIDAD:</b>	U
<b>DESCRIPCION:</b> Peso total del mecanismo igual 4,5 TON.	<b>CÓDIGO:</b>	QC-TP-12T-006

EQUIPOS							
CODIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C/R	PRT (%)
	<b>SUBTOTAL EQUIPOS</b>					<b>0</b>	<b>0</b>

MANO DE OBRA							
CODIGO	DESCRIPCIÓN (CATEGORÍA)	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C*R	PRT (%)
	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>0</b>	<b>0</b>

MATERIALES							
CODIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=A*B	PRT (%)	
MAT-1	ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36	KGR	1.850,30	4,39	8.122,82	15,80	
MAT-2	ACERO AISI 4340	KGR	910,2	4,37	3.977,57	7,74	
MAT-3	ACERO ASTM A381	KGR	83,8	8,77	734,93	1,43	
MAT-4	ACERO AISI 304	KGR	194,4	7,66	1.489,10	2,90	
MAT-5	RODAMIENTOS NU2315	U	32	424,48	13.583,36	26,43	
MAT-6	ANILLOS DE RETENCIÓN	U	32	2,38	76,16	0,15	
MAT-7	PERNOS	KGR	39,1	4,82	188,46	0,37	
MAT-8	TUERCAS	KGR	32	6,04	193,28	0,38	
MAT-9	RACOR SENCILLO DE LUBRICACIÓN 5/8"	U	24	1,53	36,72	0,07	
MAT-10	POLEA DIÁM. 620	U	8	625,75	5.006,00	9,74	
MAT-11	TAPA POLEA DIÁM. 620	U	8	255,6	2.044,80	3,98	
MAT-12	ESPARRAGOS	U	24	12,42	298,08	0,58	
MAT-13	ELASTOMERO DIÁM. 620	U	8	616	4.928,00	9,59	
MAT-14	POLEA DIÁM. 520	U	8	523,85	4.190,80	8,15	
MAT-15	TAPA POLEA DIÁM. 520	U	8	215,34	1.722,72	3,35	
MAT-16	RESORTES	U	85	4	340,00	0,66	
MAT-17	ELASTOMERO DIÁM. 520	U	8	558	4.464,00	8,69	
	<b>SUBTOTAL MATERIALES</b>				<b>51.396,80</b>	<b>100,00</b>	

TRANSPORTE							
CODIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=A*B	PRT (%)	
	<b>SUBTOTAL TRANSPORTE</b>				<b>0</b>	<b>0</b>	
<b>TOTAL, COSTO DIRECTO</b>					<b>51.396,80</b>		
<b>INDIRECTOS Y UTILIDADES (15%)</b>					<b>7.709,52</b>		
<b>VALOR OFERTADO</b>					<b>59.106,32</b>		

[Fuente: Propia]

A continuación, se muestra la “Tabla 51”, la cual resume los resultados obtenidos mediante el estudio de ingeniería de costos de los mecanismos diseñados:

Tabla 51. Precio unitario de los mecanismos del proyecto.

N°	RUBRO	COSTO (USD)
1	Suministro, fabricación y ensamble de tren de 8 poleas a compresión	\$ 26.021,79
2	Suministro, fabricación y ensamble de tren de 10 poleas a compresión	\$ 33.951,63
3	Suministro, fabricación y ensamble de tren de 12 poleas a compresión	\$ 40.012,86
4	Suministro, fabricación y ensamble de tren de 8 poleas a tracción	\$ 28.055,11
5	Suministro, fabricación y ensamble de tren de 10 poleas a tracción	\$ 36.606,86
6	Suministro, fabricación y ensamble de tren de 12 poleas a tracción	\$ 43.128,46
7	Suministro, fabricación y ensamble de tren mixto de poleas	\$ 59.106,32

[Fuente: Propia]

## 2.6. Simulaciones de elementos críticos del sistema de trenes de poleas.

Las simulaciones de elementos críticos fueron realizadas en “ANSYS 18”, el cual es un software enfocado en el análisis por el método de elementos finitos muy versátil.

Se realizó las simulaciones de todos los ejes que componen el tren de 12 poleas y las placas con solicitaciones críticas.

Proceso de la simulación.

Para la simulación se obtuvo los sólidos (Geometría), del modelamiento en el software “SolidWorks” en formato “. step”.

Ejemplo de simulación: Eje principal, Tren de 12 Poleas.

1. Seleccionamos el módulo "Static Structural", véase figura (2.59).



Figura 2.59. Selección del Módulo  
[Fuente: Propia]

2. Cargamos la geometría (Modelo 3D) al programa, figura (2.60)

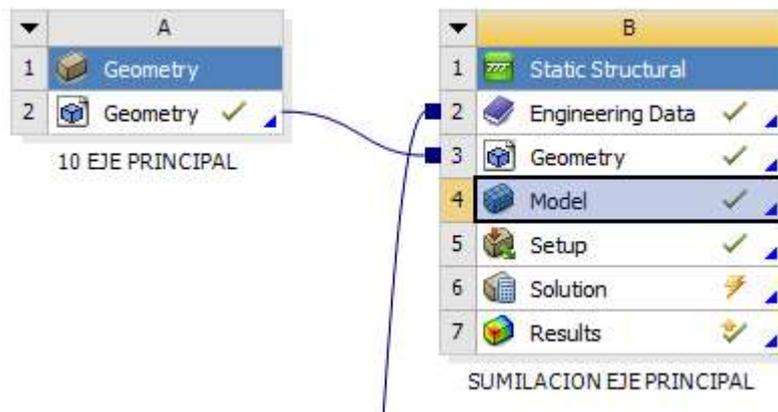


Figura 2.60. Anclaje de Geometría  
[Fuente: Propia]

3. Cargamos el material desde la biblioteca de ANSYS. WB 18, figura (2.61).

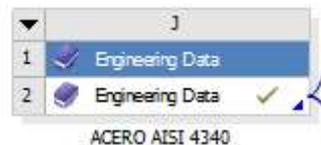


Figura 2.61. Selección del material  
[Fuente: Propia]

- Una vez el modelo listo se generó un mallado idóneo para la interpretación del fenómeno físico.

El mallado de un elemento nos permite acercarnos a condiciones cercanas a la realidad, lo cual nos permite obtener resultados altamente fiables dependiendo del tipo de mallado y la calidad del mallado.

Método de Mallado: Tetraedros, figura (2.62)

Calidad del mallado definido por la ortogonalidad, figura (2.63).

El rango de calidad u ortogonalidad de la malla que se busca es entre 0,7 y 1, si los valores de medias caen dentro de este rango sabemos que obtenemos una malla que se aproxima más al describir el fenómeno real, además es un indicador de que tan bien se encuentran empastados los elementos.

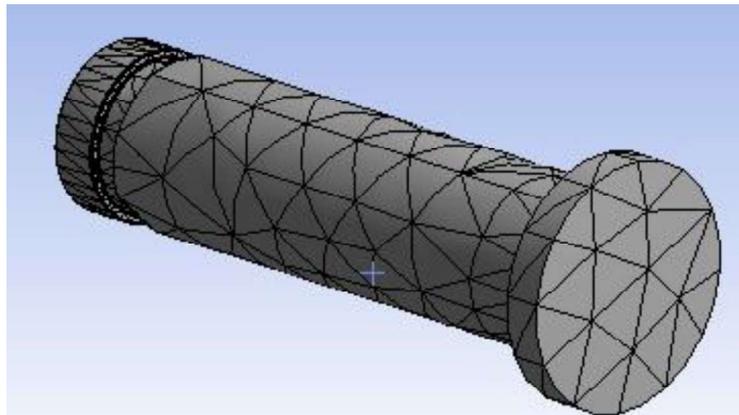


Figura 2.62. Primera malla generada.  
[Fuente: Propia]

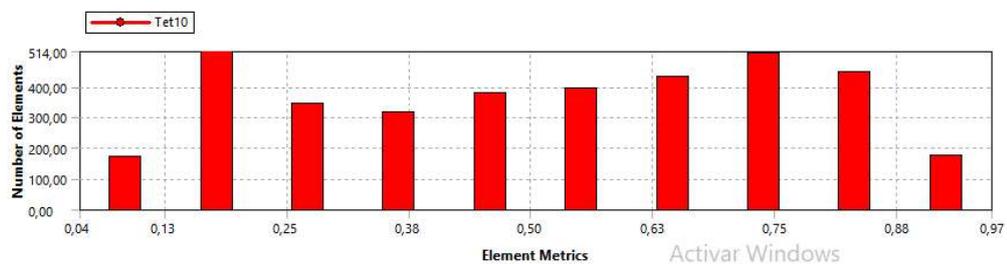
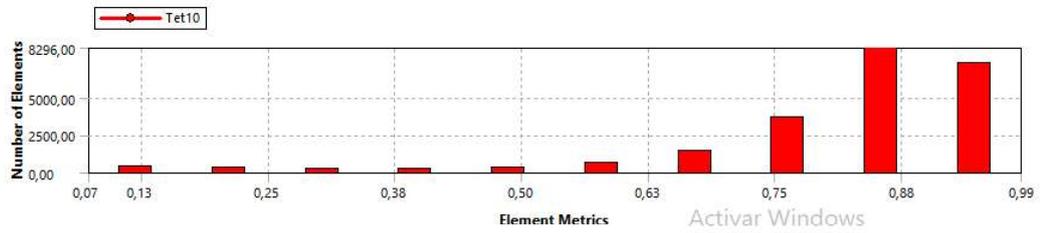


Figura 2.63. Ortogonalidad de la primera malla  
[Fuente: Propia]

Después de varias iteraciones en el mallado, se llegó a un modelo con ortogonalidad de mayor a 0,8, figura (2.64).



Mesh Metric	Orthogonal Quality
Min	7,2398e-002
Max	0,99245
Average	0,81451
Standard Deviation	0,16419

Figura 2.64. Ortogonalidad malla final  
[Fuente: Propia]

Obteniendo la siguiente malla para el elemento, figura (2.65).

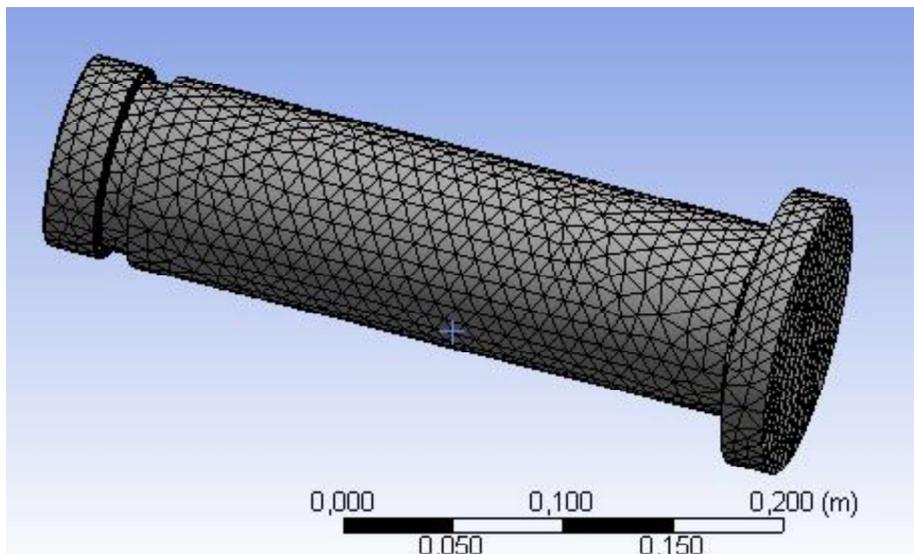


Figura 2.65. Malla Final.  
[Fuente: Propia]

5. Después se determinó la carga actuante y los soportes del elemento, Figura (2.66).

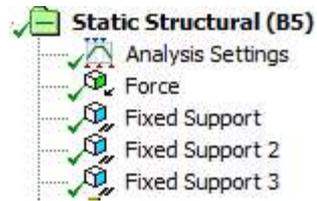


Figura 2.66. Cargas y soportes  
[Fuente: Propia]

6. Una vez estipulados los parámetros de contorno se procedió a generar los resultados de la simulación que queremos obtener.

Deformación total producida en el eje, figura (2.67).

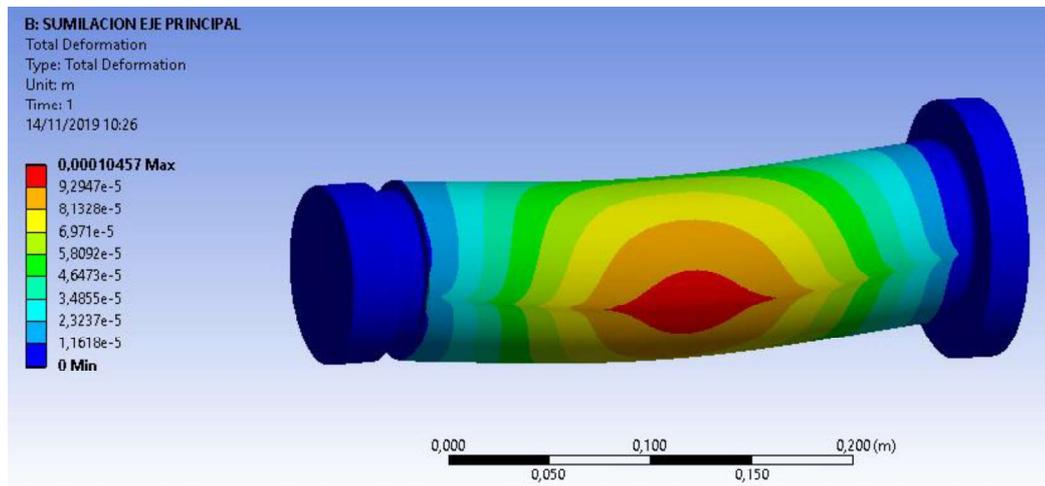


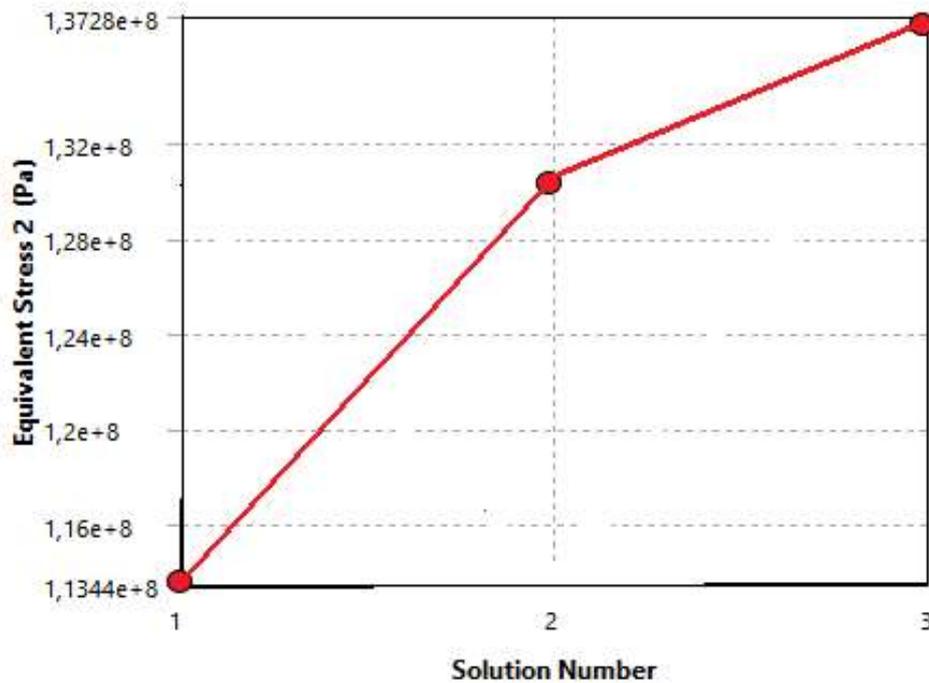
Figura 2.67. Deformación Total  
[Fuente: Propia]

Máxima deformación= 0.1 mm

Esfuerzos equivalentes de “Von Mises”

Una vez obtenidos los resultados se generó una gráfica de convergencia, para determinar si la simulación es comparable a la realidad.

Como se puede observar en la figura (2.68), se realizó 3 iteraciones en las cuales se llegó a un resultado aproximado a la realidad de los cálculos realizados con un error inferior al 5%.



	Equivalent Stress 2 (Pa)	Change (%)	Nodes	Elements
1	1,1344e+008		5760	3147
2	1,2992e+008	14,263	5326	3191
3	1,3728e+008	4,783	19107	12262

Figura 2.68. Convergencia de Esfuerzos equivalentes de VM  
[Fuente: Propia]

Esfuerzo equivalente máximo de la simulación es de 137280000 (Pa), lo que equivale a 19.91 (Ksi), el esfuerzo calculado es de 19,13 (Ksi), dando como resultado 3,92% de error en la simulación, también se puede observar que ese es el esfuerzo máximo generado y que a lo largo del eje se generan diferentes esfuerzos inferiores a este.

En la figura (2.69), se puede observar con mayor claridad mediante la escala cromática como se producen los esfuerzos debido a la carga impuesta, también se observa el esfuerzo máximo.

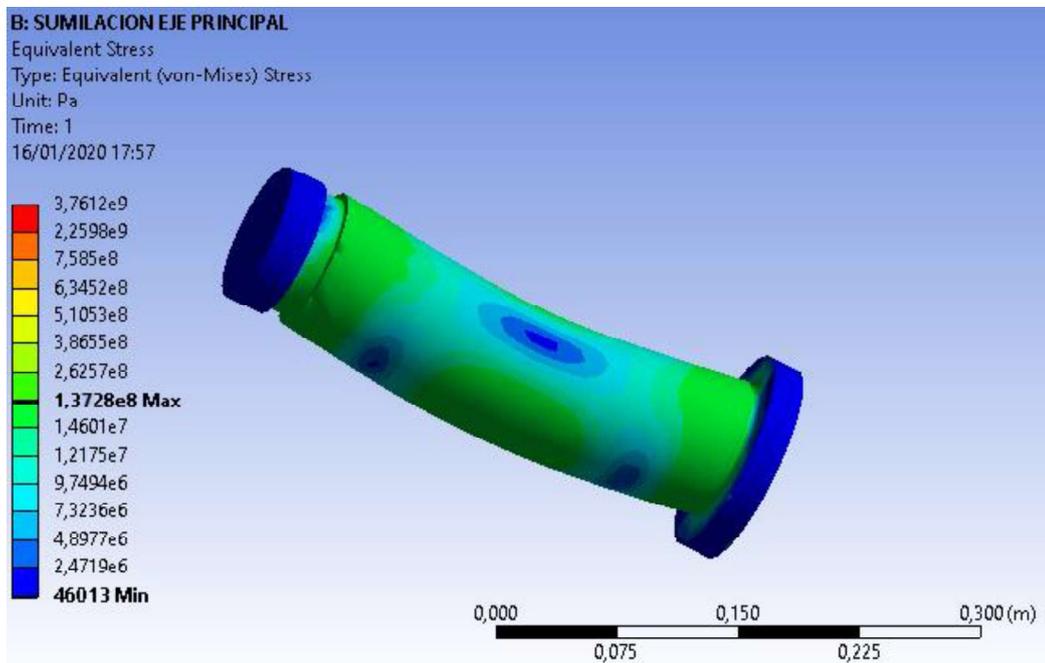


Figura 2.69. Esfuerzos equivalentes VM, eje principal para 12 poleas [Fuente: Propia]

7. Para determinar el factor de seguridad se utilizaron herramientas de diseño a fatiga, y se lo analizo bajo los siguientes parámetros.

➤ Goodman, Figura (2.70)

Fluctuación de esfuerzo del 20%

Teoría de energía de distorsión.

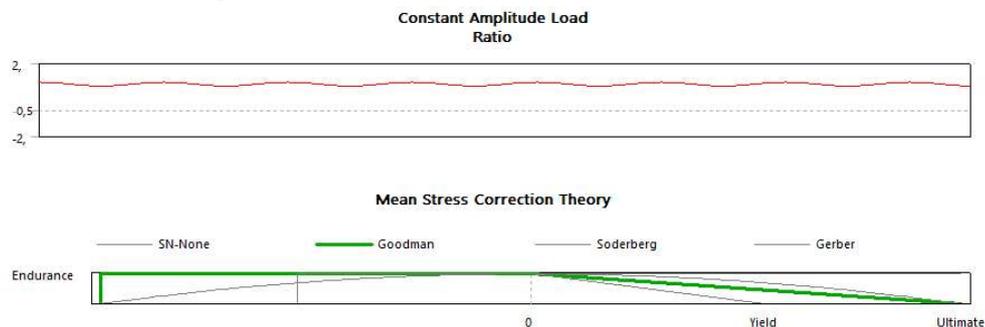


Figura 2.70. Curva de falla a fatiga de Goodman y fluctuación de esfuerzo [Fuente: Propia]

Obteniendo como resultados lo siguiente, figura (2.71).

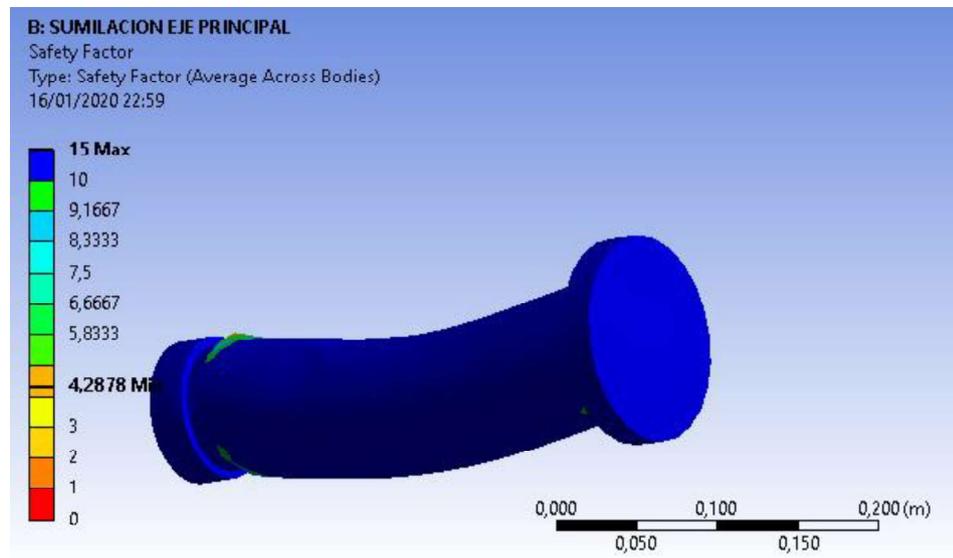


Figura 2.71. Factor de seguridad a fatiga según Goodman del eje principal.  
 [Fuente: Propia]

Se puede observar que el factor de seguridad mínimo para Goodman es de 4,28, y un factor máximo de 15, por consiguiente, podemos inferir en base a los cálculos realizados donde se obtuvo un factor de seguridad en los puntos críticos de 4,46, que la simulación en cuanto al factor de seguridad para las teorías de falla a fatiga de “Goodman” tiene un error de 3,81%.

➤ Soderberg, figura (2.72)

Fluctuación de esfuerzo del 20%

Teoría de energía de distorsión.

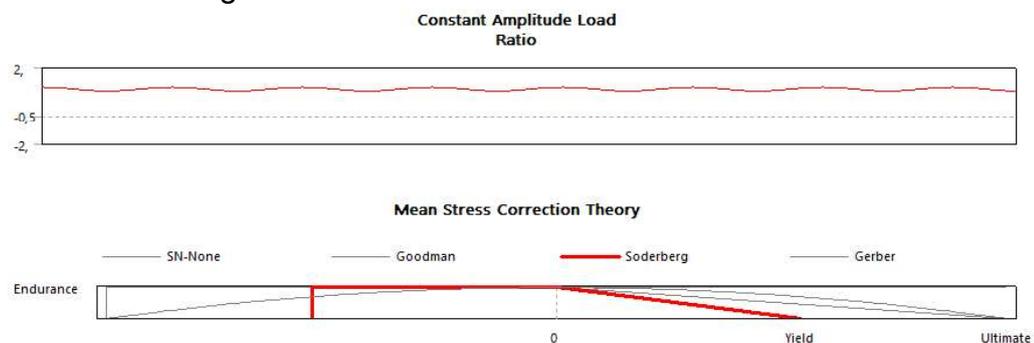


Figura 2.72. Curva de falla a fatiga de Soderberg y Fluctuación de esfuerzo.  
 [Fuente: Propia]

Del análisis se obtuvo los siguientes resultados, como se observa en la figura (2.73).

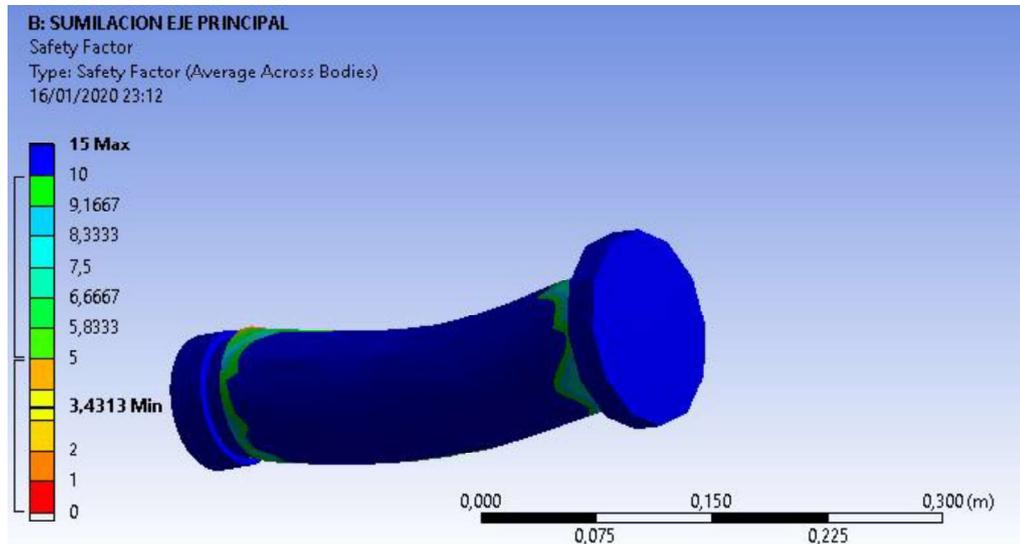


Figura 2.73. Factor de seguridad de Soderberg para el eje principal  
[Fuente: Propia]

Se puede observar que el factor de seguridad mínimo para Soderberg, es de 3,43, y un factor máximo de 15, por consiguiente, podemos inferir en base a los cálculos realizados donde se obtuvo un factor de seguridad en los puntos críticos de 3,58, que la simulación en cuanto al factor de seguridad para las teorías de falla a fatiga de “Goodman” tiene un error de 4,19%.

Los materiales utilizados para la simulación fueron:

- AISI 4340 -Ejes (2 Poleas largo. 4 poleas, 6 poleas, 12 poleas)
- AISI 304- Ejes (1 Polea, 2 Poleas corto)
- ASTM A-36 - Placas

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. Resultados del dimensionamiento de acuerdo con su tipología

Al haber finalizado el presente proyecto, se logró cumplir con los objetivos estipulados inicialmente; el desarrollo de la ingeniería de detalle del mecanismo de guiado y soporte del cable tractor-portador para la línea Ofelia-Roldós del proyecto Quito Cables.

Todos los dimensionamientos de los diferentes tipos de trenes de poleas se lo hicieron en base a la carga más crítica en cada tipo. En la tabla 52 se muestra las dimensiones de los elementos dimensionados para un tren de 12 poleas, en base a su factor de seguridad.

Tabla 52.Resultados, Tren de 12 Poleas.

Descripción	Especificación	Material	Procedencia	Qty
Viga principal	Tubo 300x240x12	A36	DIPAC	1
Viga secundaria	Tubo 200x160x8	A36	DIPAC	2
Eje en la polea	Eje 2"	AISI 304	DIPAC	12
Bocín	53X60	A381	IVAN BOHMAN	12
Rodamiento	NU412	RODILLOS	FAG	24
Eje 2 poleas	Eje 2 1/2"	AISI 304	DIPAC	6
Bocín	65x70	A381	IVAN BOHMAN	6
Eje 4 poleas	Eje 3"	AISI 4340	DIPAC	2
Bocín	78x85	A381	IVAN BOHMAN	2
Eje 6 Poleas	Eje 3"	AISI 4340	DIPAC	2
Bocín	78x85	A381	IVAN BOHMAN	2
Eje Carga total	Eje 3 1/2"	AISI 4340	DIPAC	1
Bocín	91x96	A381	IVAN BOHMAN	1

[Fuente: Propia]

En la tabla 53 se muestran las dimensiones de los elementos diseñados para un tren de 10 poleas, en base a su factor de seguridad.

Tabla 53. Resultados, Tren de 10 Poleas

Descripción	Especificación	Material	Procedencia	Qty
Viga principal	Tubo 300x240x12	A36	DIPAC	1
Viga secundaria	Tubo 200x160x8	A36	DIPAC	2
Eje en la polea	Eje 2 1/2"	AISI 304	DIPAC	10
Bocín	65x75	A381	IVAN BOHMAN	10
Rodamiento	NU2315	RODILLOS	FAG	20
Eje 2 poleas	Eje 3"	AISI 304	DIPAC	5
Bocín	78x85	A381	IVAN BOHMAN	5
Eje 4 poleas	Eje 3 1/2"	AISI 4340	DIPAC	2
Bocín	91x96	A381	IVAN BOHMAN	2
Eje 6 Poleas	Eje 3"	AISI 4340	DIPAC	1
Bocín	78x85	A381	IVAN BOHMAN	1
Eje Carga total	Eje 3 1/2"	AISI 4340	DIPAC	1
Bocín	91x96	A381	IVAN BOHMAN	1

[Fuente: Propia]

En la Tabla 54 se muestra las dimensiones de los elementos dimensionados para un tren de 8 poleas, en base a su factor de seguridad.

Tabla 54. Resultados, Tren de 8 Poleas

Descripción	Especificación	Material	Procedencia	Qty
Viga principal	Tubo 300x240x12	A36	DIPAC	1
Viga secundaria	Tubo 200x160x8	A36	DIPAC	2
Eje en la polea	Eje 2 1/2"	AISI 304	DIPAC	8
Bocín	65x75	A381	IVAN BOHMAN	8
Rodamiento	NU2315	RODILLOS	FAG	16
Eje 2 poleas	Eje 3"	AISI 304	DIPAC	4
Bocín	78x85	A381	IVAN BOHMAN	4
Eje 4 poleas	Eje 3 1/2"	AISI 4340	DIPAC	2
Bocín	91x96	A381	IVAN BOHMAN	2
Eje 6 Poleas	Eje 3"	AISI 4340	DIPAC	0
Bocín	78x85	A381	IVAN BOHMAN	0
Eje Carga total	Eje 3 1/2"	AISI 4340	DIPAC	1
Bocín	91x96	A381	IVAN BOHMAN	1

[Fuente: Propia]

Las placas se las obtiene a partir de planchas estándar de 2440x1220xe de A36, provenientes de "IPAC".

### 3.2. Resultados de las simulaciones

Al haber aplicado el método de elementos finitos a través de la herramienta computacional ANSYS en los elementos críticos, se realizó un análisis a fatiga en el cual obtuvieron resultados de deformación total, esfuerzos equivalentes de "Von Mises", y el factor de seguridad a fatiga.

### 3.2.1. Resultados de la simulación del eje de 1 Polea

En la “Figura 3.1” se puede observar la deformación del elemento, y se puede ver que la mayor deformación producida por la carga crítica está en el orden de las micras por lo cual en base a nuestro criterio es un elemento que cumple sus funciones, sin sufrir mayores deformaciones y se comporta de forma idónea como se puede observar en la “Figura 3.2” de los factores de seguridad.

Deformación total

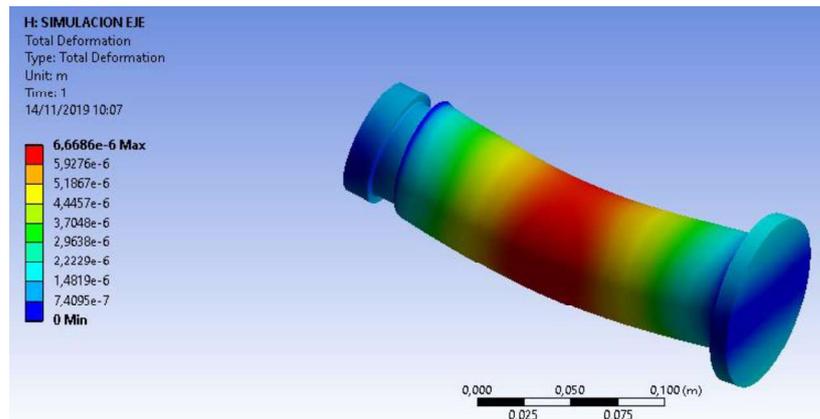


Figura 3.1.Resultados -Eje 1 Polea (Deformación total)  
[Fuente: Propia]

Esfuerzos equivalentes, Figura ( )

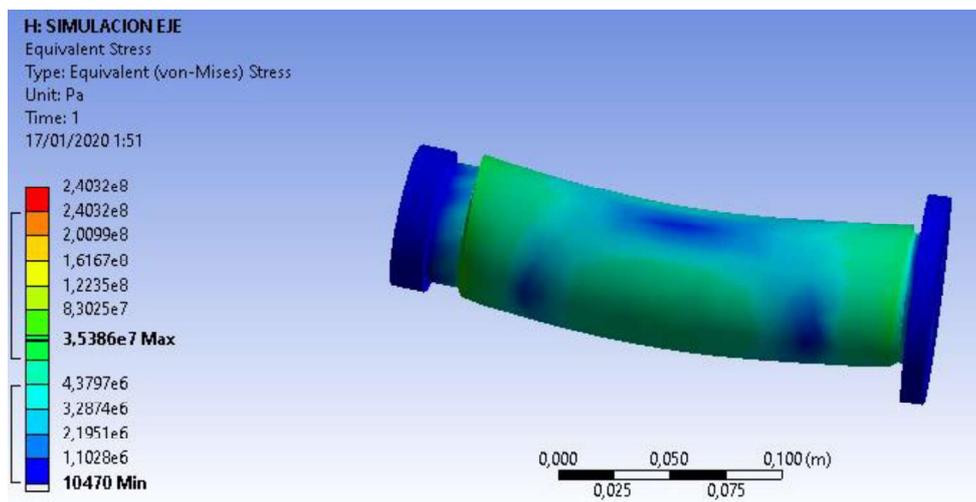


Figura 3.2.Resultados -Eje 1 Polea (Esfuerzo equivalente)  
[Fuente: Propia]

Esfuerzo Máximo (Pa)= 35386000 = 5,13 (Ksi)

Factor de seguridad.

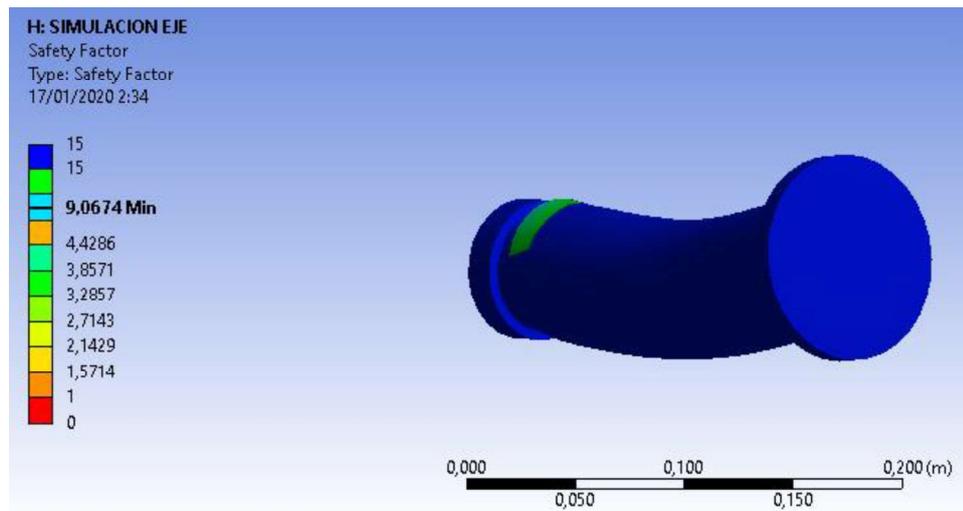


Figura 3.3. Resultado Eje 1 Polea (Fs)  
[Fuente: Propia]

Fs mínimo= 9,7

### 3.2.2. Resultados de la simulación del eje para 2 poleas tipo largo

En la “Figura 3.3” se puede observar la deformación del elemento, y se puede ver que la mayor deformación producida por la carga crítica es aproximadamente de 0.1 mm, por lo cual, en base a nuestro criterio, es un elemento que cumple sus funciones, sin sufrir mayores deformaciones y se comporta de forma idónea como se puede observar en la “Figura 3.4” de los factores de seguridad.

Deformación total

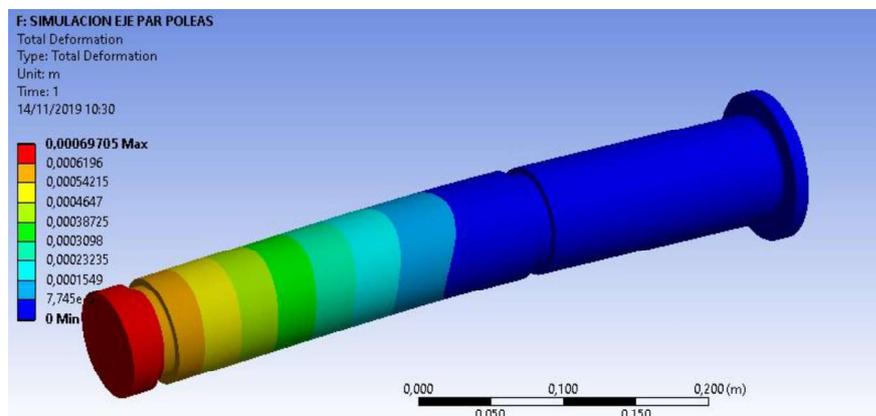


Figura 3.4. Resultados Eje 2 poleas tipo 2 (Deformación total).  
[Fuente: Propia]

Esfuerzo equivalente “Von mises”, Figura (3.4)

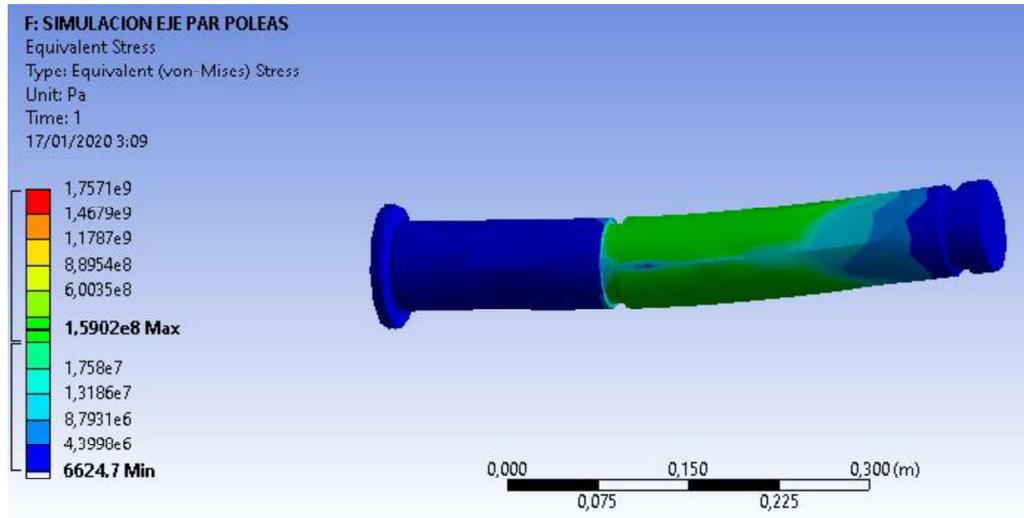


Figura 3.5. Resultados -Eje 2 Poleas largo (Esfuerzo equivalente)  
[Fuente: Propia]

Esfuerzo máximo generado= 159020000 (Pa) = 23,1 (Ksi)

Factor de seguridad, Figura (3,7)

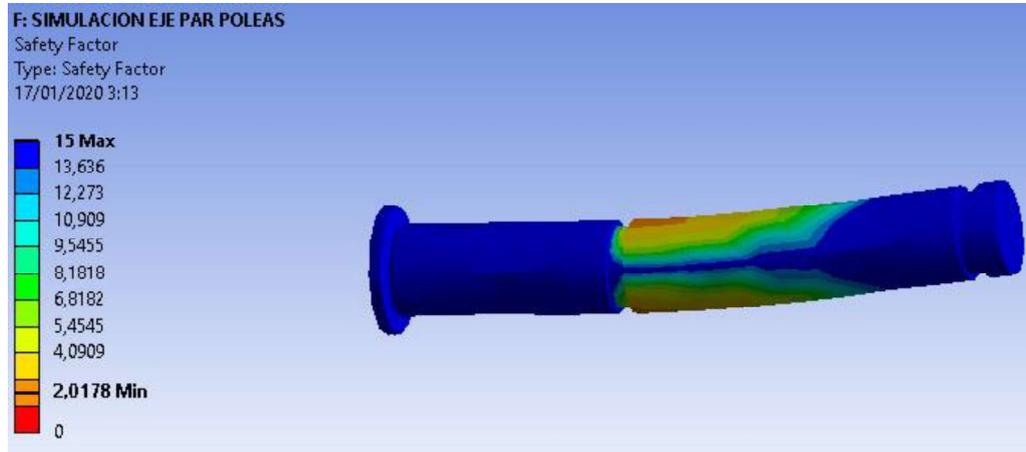


Figura 3.6. Resultados-Eje 2 Poleas tipo 2 (Fs)  
[Fuente: Propia]

Fs (mínimo)= 2,0178

### 3.2.3. Resultados de la simulación del eje para 2 poleas

En la “Figura 3.5” se puede observar la deformación del elemento, y se puede ver que la mayor deformación producida por la carga crítica está en el orden de las micras, por lo cual, en base a nuestro criterio, es un elemento que cumple sus funciones, sin sufrir mayores deformaciones y se comporta de forma idónea como se puede observar en la “Figura 3.6” de los factores de seguridad.

Deformación total

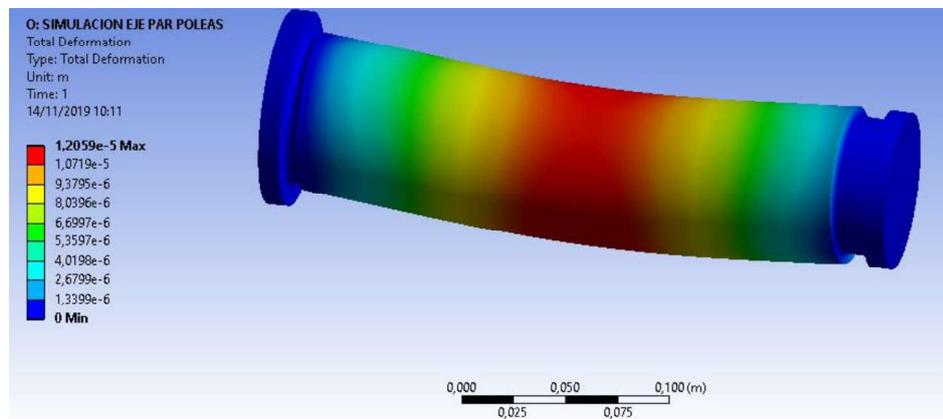


Figura 3.7. Resultado Eje 2 Poleas tipo 1 (Deformación total)  
[Fuente: Propia]

Esfuerzos equivalentes de “Von Mises”, Figura (3.8)

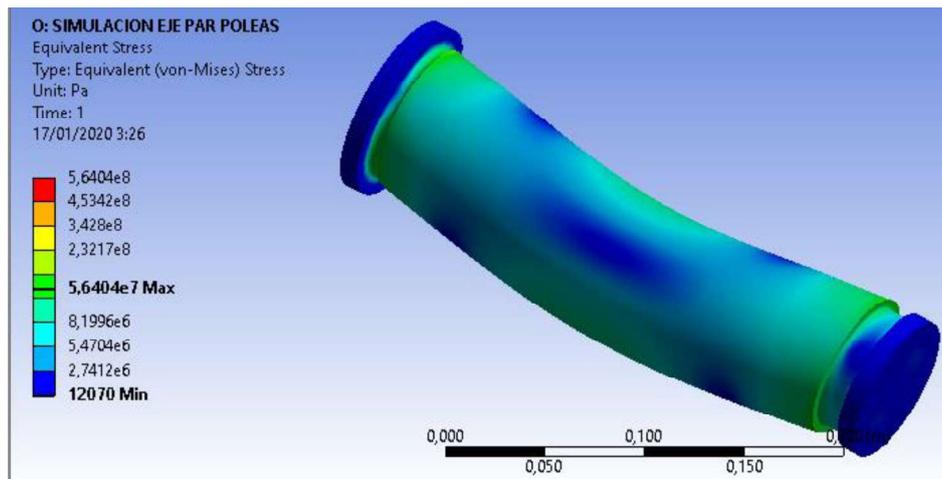


Figura 3.8. Resultados -Eje 2 Poleas (Esfuerzo equivalente)  
[Fuente: Propia]

Esfuerzo máximo=5640000 (Pa)= 8,18 (ksi)

Factor de seguridad, Figura (3.9)

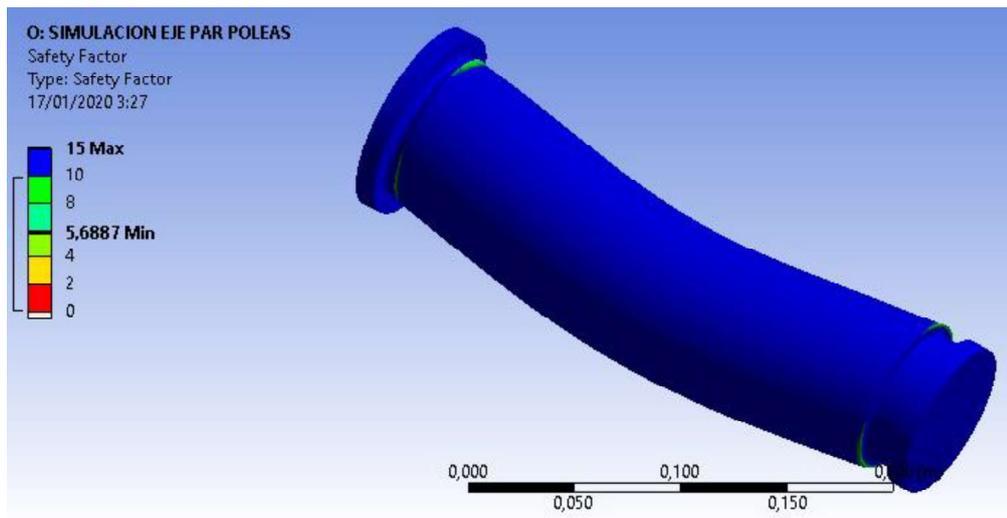


Figura 3.9. Resultado Eje 2 Poleas tipo 1 (Fs)  
[Fuente: Propia]

Fs (mínimo)= 5,68

### 3.2.4. Resultados de la simulación del eje para 4 poleas

En la “Figura 3.7” se puede observar la deformación del elemento, y se puede ver que la mayor deformación producida por la carga crítica está en el orden de las micras, por lo cual, en base a nuestro criterio, es un elemento que cumple sus funciones, sin sufrir mayores deformaciones y se comporta de forma idónea como se puede observar en la “Figura 3.8” de los factores de seguridad.

Deformación total

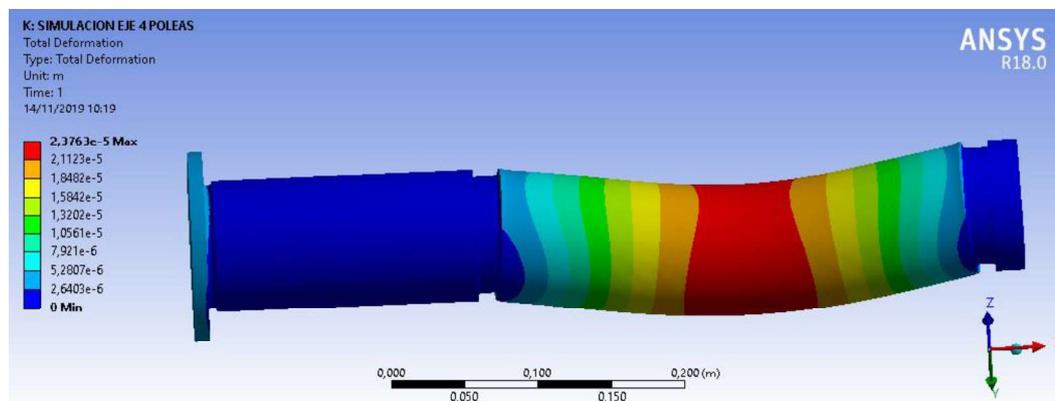


Figura 3.10. Resultados-Eje 4 poleas (Deformación total)  
[Fuente: Propia]

Esfuerzos equivalentes de “Von Mises”, Figura (3.11)

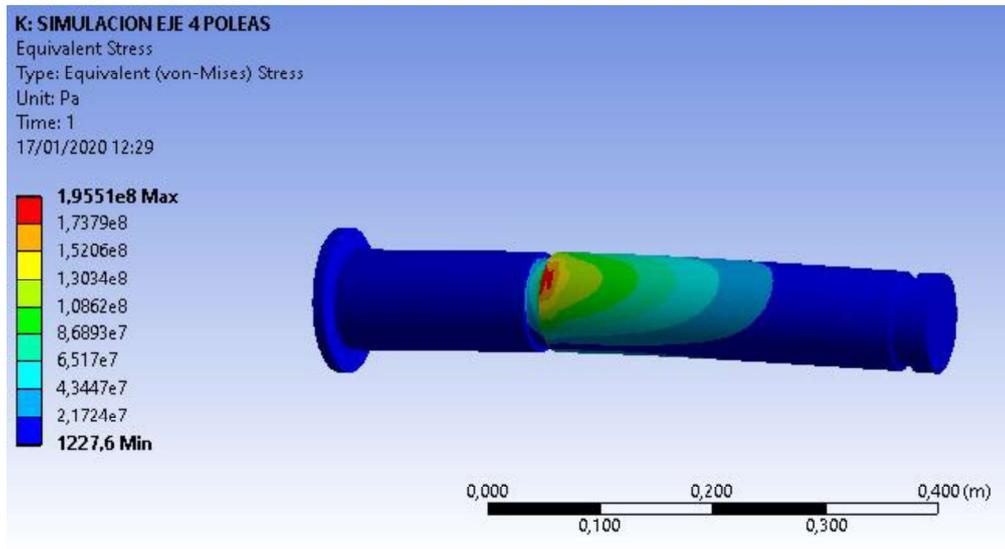


Figura 3.11. Resultados-Eje 4 poleas (Esfuerzos equivalentes)  
[Fuente: Propia]

Esfuerzo equivalente máximo= 195510000 (Pa)= 28,35 (Ksi)

Factor de seguridad.

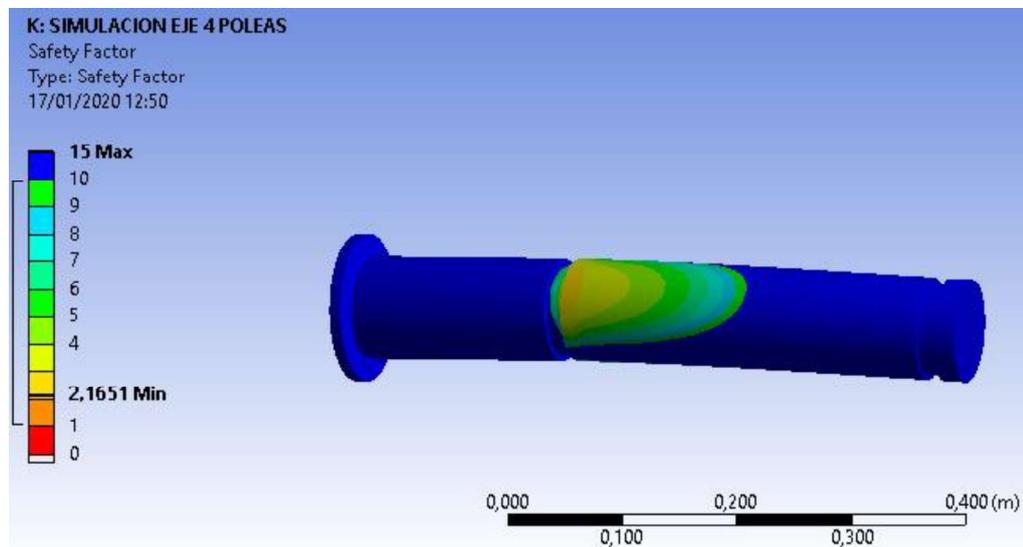


Figura 3.12. Resultados- Eje 4 poleas (Fs)  
[Fuente: Propia]

Fs (mínimo)= 2,16

### 3.2.5. Resultados de la simulación del eje para 6 poleas

En la “Figura 3.9” se puede observar la deformación del elemento, y se puede ver que la mayor deformación producida por la carga crítica está en el orden de las micras, por lo cual, en base a nuestro criterio, es un elemento que cumple sus funciones, sin sufrir mayores deformaciones y se comporta de forma idónea como se puede observar en la “Figura 3.10” de los factores de seguridad.

Deformación total

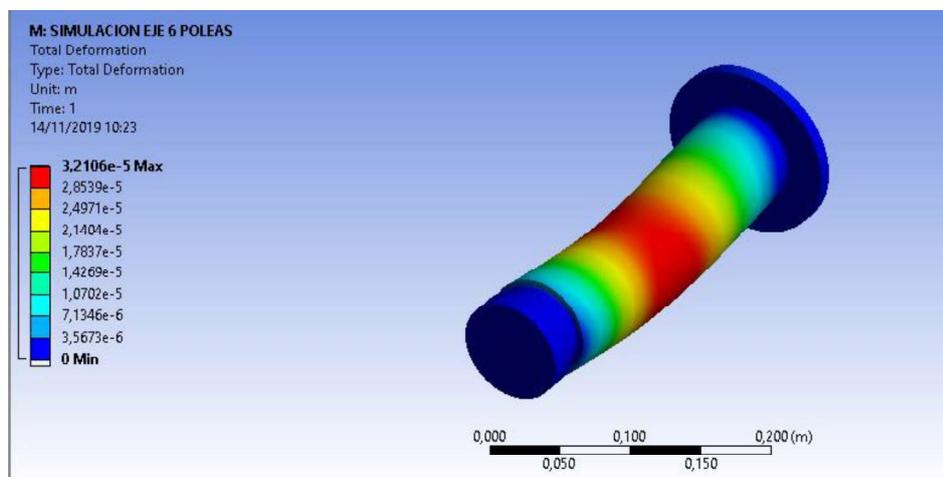


Figura 3.13. Resultado- Eje 6 Poleas (Deformación total)  
[Fuente: Propia]

Esfuerzos equivalentes en el eje, Figura (3.13)

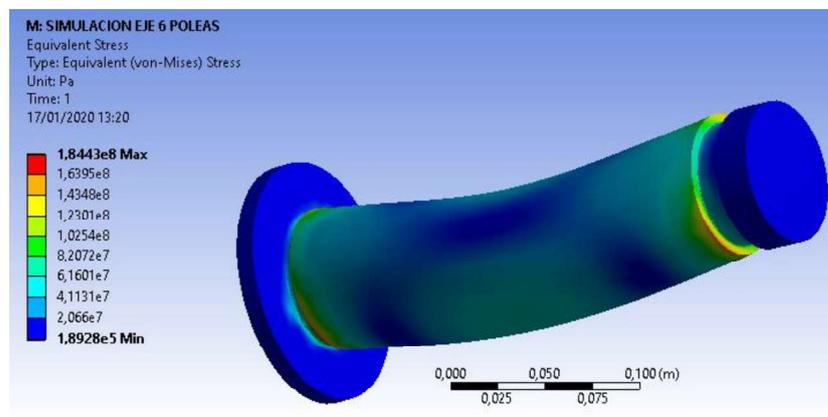


Figura 3.14. Resultado- Eje 6 Poleas (Esfuerzo equivalente)  
[Fuente: Propia]

Esfuerzo máximo equivalente= 184430000 (Pa)= 26,74 (Ksi)

Factor de seguridad, Figura (3.14).

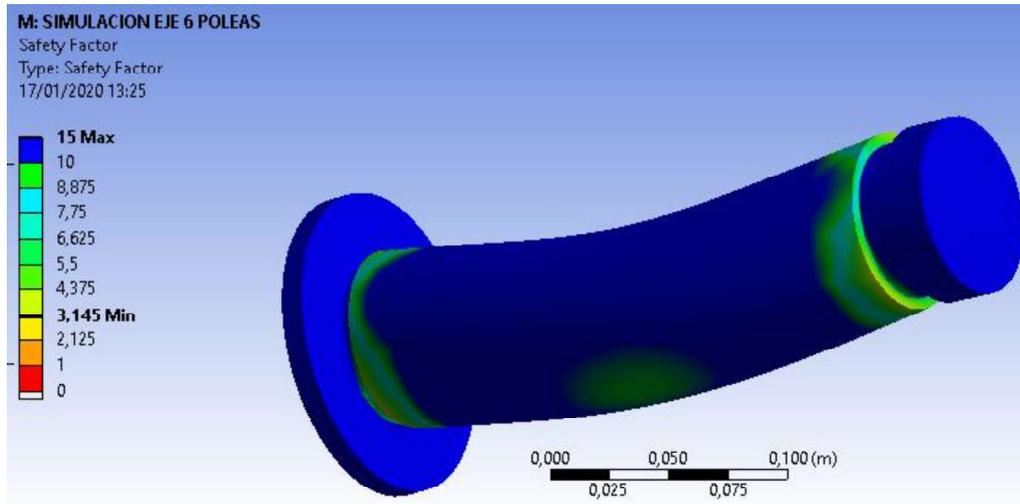


Figura 3.15. Resultado- Eje 6 poleas (Fs)  
[Fuente: Propia]

Fs (Minimo) 3,145

### 3.2.6. Resultados de la simulación del eje para 12 poleas

En la “Figura 3.11” se puede observar la deformación del elemento, y se puede ver que la mayor deformación producida por la carga crítica está en el orden de las micras, por lo cual, en base a nuestro criterio, es un elemento que cumple sus funciones, sin sufrir mayores deformaciones y se comporta de forma idónea como se puede observar en la “Figura 3.12” de los factores de seguridad.

Deformación total

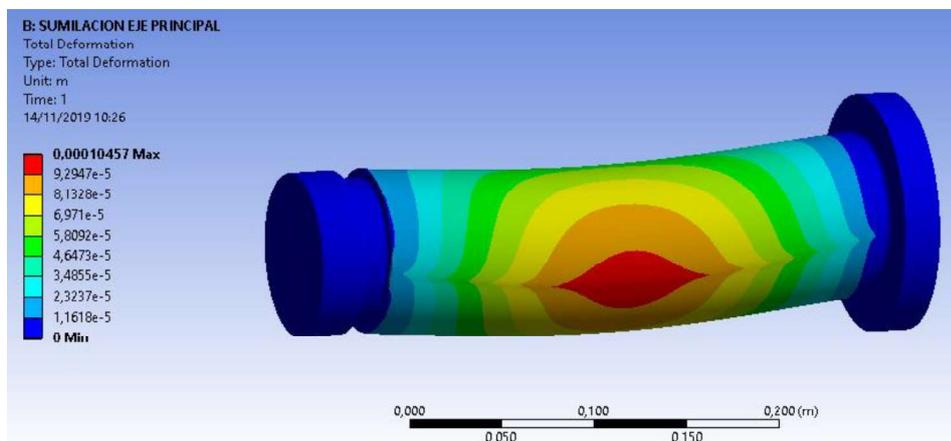


Figura 3.16. Resultado-Eje 12 Poleas (Deformación total)  
[Fuente Propia]

Esfuerzos equivalentes, Figura (3.17)

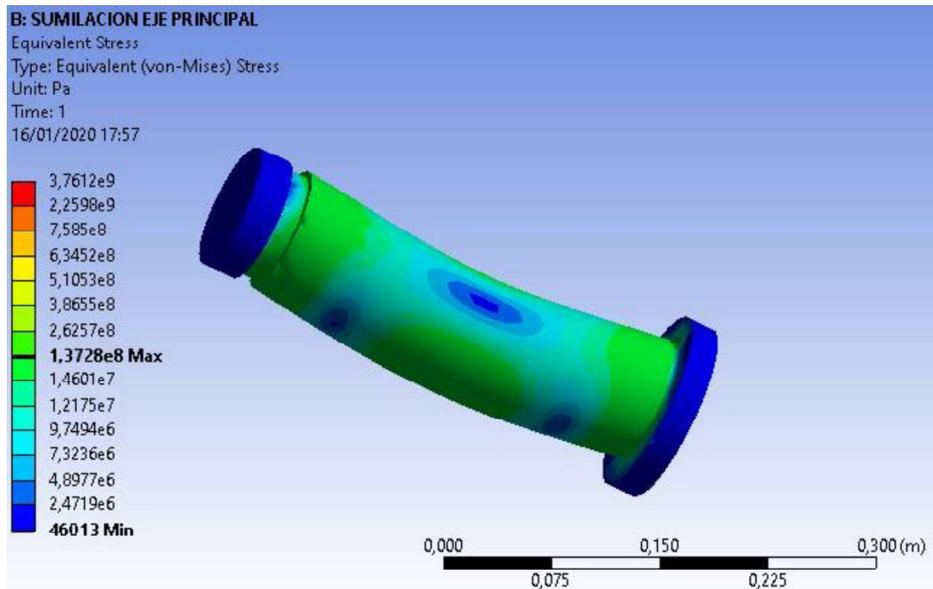


Figura 3.17. Resultado-Eje 12 Poleas (Esfuerzos equivalentes)  
[Fuente Propia]

Esfuerzo equivalente máximo= 137280000 (Pa)=19,91 (Ksi)

Factor de seguridad, Figura (3.18)

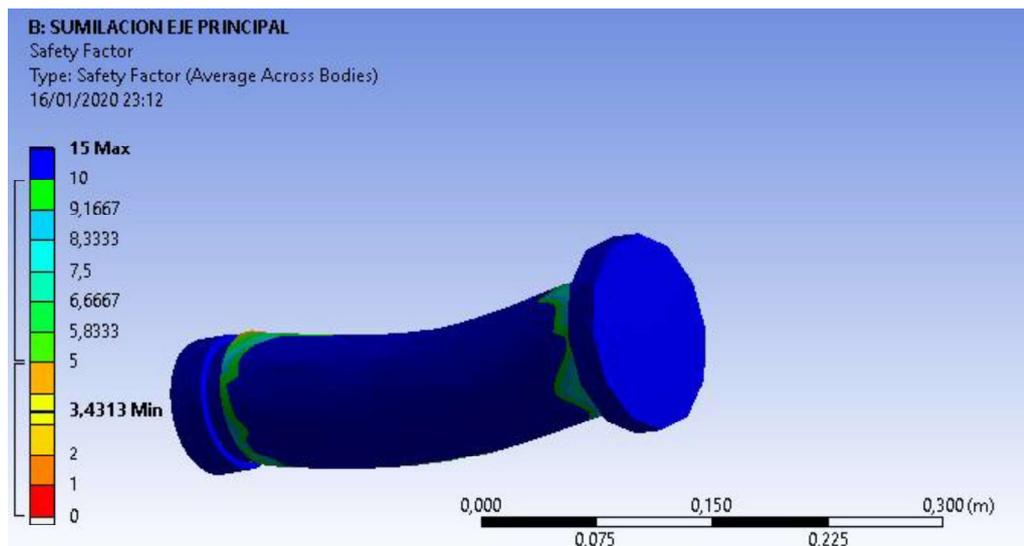


Figura 3.18. Resultado- Eje 12 Poleas (Fs)  
[Fuente: Propia]

Fs (mínimo) = 3,41

### 3.2.7. Resultados de la simulación de la placa de conexión principal.

En la “Figura 3.13” se puede observar la deformación del elemento, y se puede ver que la mayor deformación producida por la carga crítica es de aproximadamente 0,1 mm, por lo cual, en base a nuestro criterio, es un elemento que cumple sus funciones, sin sufrir mayores deformaciones y se comporta de forma idónea como se puede observar en la “Figura 3.14” de los factores de seguridad.

Deformación total

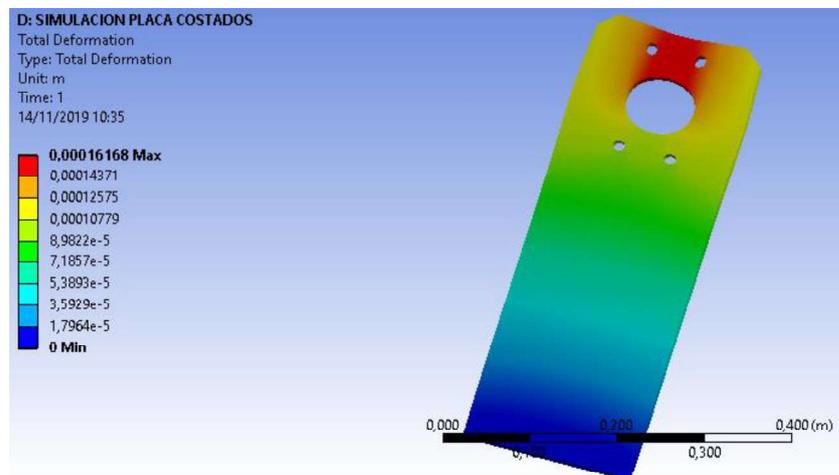


Figura 3.19. Resultado- Placa de conexión (Deformación total)  
[Fuente: Propia]

Factor de seguridad.

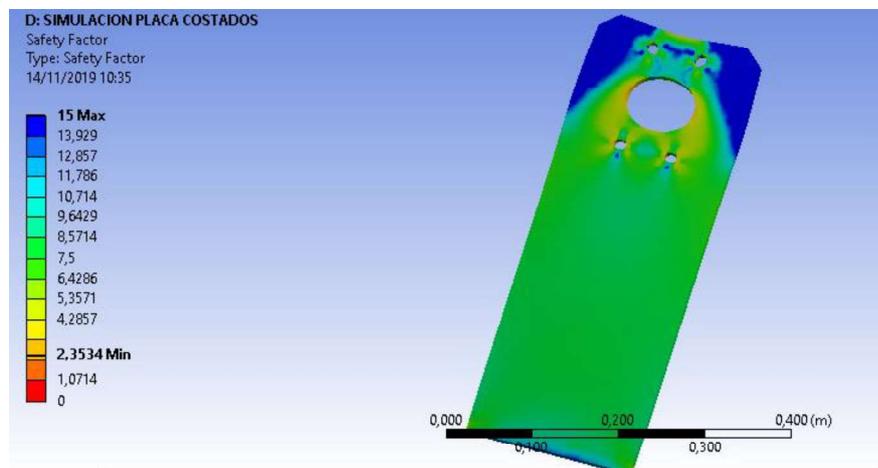


Figura 3.20. Resultado-Placa de conexión (Fs)  
[Fuente: Propia]

### 3.2.8. Resumen de Resultados.

A continuación, se muestra en la “Tabla 53”, el resumen de los resultados obtenidos mediante el método de elementos finitos, brindado por la herramienta computacional ANSYS.

Tabla 55. Resumen de los resultados obtenidos en ANSYS.

ELEMENTO	MÁXIMA DEFORMACIÓN [m]	ANSYS	CALCULOS	ERROR %
		Esfuerzos Equivalentes (Ksi)	Esfuerzos Equivalentes (Ksi)	
Eje 1 polea	$6,66 \times 10^{-6}$	5,13	5,01	2,4%
Eje 2 poleas tipo 2	$6,9 \times 10^{-4}$	23,1	24	3,8%
Eje 2 poleas tipo 1	$1,2 \times 10^{-5}$	8,18	7,8	4,9%
Eje 4 poleas	$2,37 \times 10^{-5}$	28,35	27,45	3,3%
Eje 6 poleas	$3,21 \times 10^{-5}$	26,74	25,9	3,2%
Eje 12 poleas	$10,4 \times 10^{-4}$	19,91	19,13	4,1%
Placa de conexión	$1.61 \times 10^{-4}$	/	/	/

[Fuente: Propia]

En el caso de la deformación total, se logró determinar que las magnitudes no alcanzan valores a tomar en consideración, ya que son menores a un milímetro.

Los resultados de los esfuerzos equivalentes convergen una vez seleccionado un mallado adecuado para cada elemento, para los ejes se tomó un mallado de calidad ortogonal debido a que presentan curvaturas y se los puede interpretar de mejor manera con tetraedros, en comparación con los resultados obtenidos de los cálculos se observa un error menor al 5%, por lo cual se puede afirmar que la simulación cumple con los requerimientos.

El factor de seguridad fue obtenido a base de las teorías de falla integradas en el Programa.

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1. Conclusiones**

Los trenes de poleas requieren factores de seguridad altos debido a la seguridad de las personas, por ende, los ejes deben poseer una alta resistencia a la fluencia y a la tracción debido a las grandes sollicitaciones mecánicas producidas por las cargas actuantes analizadas en el presente trabajo.

En base a los criterios y datos iniciales sobre el peso del cable, cabinas y el peso de cada persona estipulado por la norma AENOR-UNE 12930: CALCULOS, se determinó las cargas actuantes tales como; accidentales, permanentes y no permanentes, para cada una de las pilonas de la línea "Ofelia-Roldós" como puede observar en la "Tabla 12"

Las geometrías de los elementos del sistema de tren de poleas fueron seleccionadas por separado en cada uno de los elementos críticos con sus respectivos factores de seguridad según la norma "AENOR-UNE 12930: CÁLCULOS", donde nos da una referencia del factor de seguridad que se debe usar al inicio del diseño para sistemas de transporte por cables. Adicional a esto, se dimensionó cada uno de los trenes de poleas con la carga más crítica de acuerdo a su tipología, como se puede observar en los resultados.

Los elementos de conexión del mecanismo fueron dimensionados con las cargas críticas del sistema, y con factores de seguridad según la norma "AENOR-UNE 12930: CÁLCULOS" y los criterios de diseño del método ASD, de esta manera se obtuvieron las dimensiones idóneas para la placa principal del soporte que conecta el tren de poleas con las pilonas. Además, la deformación máxima que sufre la placa principal que une a la viga secundaria con la principal se encuentra en el orden de las micras, validando por completo el diseño propuesto.

Las simulaciones realizadas en ANSYS permitieron verificar los factores de seguridad y los esfuerzos generados en los puntos que no son críticos también se generó resultados para deformaciones máximas, esfuerzos máximos y factores de seguridad de cada elemento, para validar la simulación se comparó los esfuerzos

equivalentes máximos generados, con los obtenidos en los cálculos previos, buscando que estos no se alejen de los valores obtenidos en los cálculos, determinando así valores de error menores al 5%, esto se logró mediante la selección adecuada de malla para cada elemento y mediante iteraciones hasta converger en un valor.

Los planos de ingeniería de todos los trenes de poleas esquematizan a detalle los elementos que integran los trenes de poleas según su tipología, los planos de taller muestran los procesos para la transformación de la materia prima bruta en el producto final deseado, en base a la normativa respectiva.

En base al presente estudio se ha determinado que la industria ecuatoriana posee la capacidad para proveer la materia prima y la fabricación de este tipo de mecanismos, a excepción de elementos, tales como; rodamientos, anillos de sujeción y racores de lubricación.

El análisis de costos del presente proyecto permitió estimar y determinar el precio aproximado del mecanismo, mediante la metodología de cotización que manejan las distintas empresas locales. Esto ha permitido obtener un costo aproximado para el suministro, fabricación y ensamble de cada una de las tipologías de trenes de poleas del proyecto, en base al precio referencial unitario por elemento, dependiente de su materia prima y los procesos involucrados.

## **4.2. Recomendaciones**

Mediante el desarrollo del presente trabajo se ha podido observar la carencia de códigos, estándares o normativas nacionales, que regulen la construcción de este tipo de transporte, tanto para nivel turístico como para transporte público. Se recomienda a los organismos nacionales que representan a la ingeniería, tales como colegios o cámaras, desarrollar este tipo de normativas para que los futuros proyectos de esta índole, pueda garantizar su confiabilidad al momento de entrar en operación.

Uno de los elementos que facilita el mantenimiento es el recubrimiento del muelle de las poleas, el cual es un tipo de caucho importado que tiene un desgaste de 3 mm en 2 años, no existe este material en la industria ecuatoriana, por lo que se recomienda para complementar este trabajo, realizar una caracterización de este caucho que es utilizado en el teleférico de Cruz Loma.

Se recomienda realizar un estudio meteorológico más profundo de la forma en que actúa el viento en las cabinas y como afecta, al sistema teleférico, las cargas excesivas.

Mediante el desarrollo del presente trabajo se ha podido observar la carencia de códigos, estándares o normativas nacionales, que regulen la construcción de este tipo de transporte, tanto para nivel turístico como para transporte público. Se recomienda a los organismos nacionales que representan a la ingeniería, tales como colegios o cámaras, desarrollar este tipo de normativas para que los futuros proyectos de esta índole, pueda garantizar su confiabilidad al momento de entrar en operación.

El mecanismo de trenes de poleas es tan solo uno de los sistemas que componen al área electromecánica de teleféricos. El presente estudio ha mostrado un análisis de desagregación tecnológica, el cual muestra que la industria ecuatoriana cuenta con la capacidad en infraestructura como para desarrollar el presente proyecto. Se recomienda realizar un análisis global de desagregación tecnológica de todos los rubros involucrados dentro de este tipo de proyectos, para poder evaluar el porcentaje de valor agregado que puede aportar el país.

Para el desarrollo de este tipo de proyectos, es necesario tomar en cuenta distintas áreas que afectan directamente al comportamiento de estos sistemas, por ejemplo, estudios meteorológicos del lugar donde se implantarán estas facilidades, permitirán saber cómo se comportarán estas estructuras ante condiciones normales y extremas del lugar. Factores tales como el viento y la sísmica del lugar, son condiciones iniciales para el desarrollo de estos proyectos.

Al momento de iniciar la construcción de este proyecto, se recomienda trabajar con los procedimientos precalificados (WPS) descritos por la normativa AWS D1.1 que se adapten al tipo de junta propuesto mediante este diseño.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Alba, «Alba y sus viajes,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.albaysusviajes.com/telefericos-y-funiculares-del-tirol-no-te-pierdas-estos-4/>].
- [2] E. d. e. telefericos, «Leitner Ropeways,» Leiter, 2012. [En línea]. Available: [/www.leitner-ropeways.com/es/empresa/informaciones-utiles/elementos-de-telefericos/](http://www.leitner-ropeways.com/es/empresa/informaciones-utiles/elementos-de-telefericos/).
- [3] Proviqsa, «ABS GROUP,» Distribuidora de productos de Izaje , 2014. [En línea]. Available: [proviqsa.com.mx](http://proviqsa.com.mx). [Último acceso: 2019].
- [4] A. UNE, *EN 12930: Requisitos de seguridad de las instalaciones de transporte por cable destinados a personas: CALCULOS*, Española, 2015.
- [5] I. CONSULTING, «Cable centro S.A,» [En línea]. Available: <http://www.cablecentrosac.com/cables.html>.
- [6] L. r. r. online, «La razón social,» 10 2017. [En línea]. Available: [//www.la-razon.com/sociedad/Estudio-plantea-lineas-teleferico-Sucre\\_0\\_2796920294.html](http://www.la-razon.com/sociedad/Estudio-plantea-lineas-teleferico-Sucre_0_2796920294.html). [Último acceso: 2019].
- [7] M. d. o. públicas, «NEC-Cargas no sismicas,» de *Norma Ecuatoriana de la construcción*, Quito , 205.
- [8] «EL COMERCIO,» 3 Octubre 2018. [En línea]. Available: <https://www.elcomercio.com/actualidad/aumento-parque-automotor-quito-movilidad.html>.

- [9] «BID,» 03 octubre 2018. [En línea]. Available: <https://blogs.iadb.org/ciudadessostenibles/2017/08/11/telefericos-alternativa-transporte-urbano/>.
- [10] M. d. o. públicas, «Trazado de la línea Quito CABLES,» Quito, 2017.
- [11] «Asesor de calidad,» QFD, 11 2019. [En línea]. Available: <http://asesordecalidad.blogspot.com/2017/03/qfd-la-casa-de-la-calidad-herramienta.html#.XcwNI1dKjcc>.
- [12] A. I. o. S. Construction, Especificación AISC 360-10 para construcciones de acero, Santiago de Chile: ALECERO, 2010.
- [13] A. I. o. S. Construction, Manual de construcción en acero, Octava Edición ed., 1986.
- [14] W. Online, «WeatherOnline Ltd. - Meteorological Services,» WeatherOnline Ltd., 2019. [En línea]. Available: <https://www.woespana.es/weather/maps/city?WMO=84071&CONT=samk&LAND=EQ&ART=WST&LEVEL=162&MOD=tab>. [Último acceso: 2019].
- [15] M. d. t. y. comunicaciones, «Pliego de condiciones técnicas para la construcción y explotación de las instalaciones de teleféricos y funiculares para transporte de viajeros,» Ministerio de transportes y comunicación, España, 1998.
- [16] J. K. N. Richard G. Budynas, Diseño de máquinas de Shigley, México DF: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2008.

- [17] FAG, Rodamientos FAG, Catálogo WL 41 520/3 SB, Barcelona: TECFOTO, 2000.
- [18] E. F. Magyesy, Manual de recipientes a presión, Barcelona : Editorioal LIMUSA , 1992.
- [19] M. y. herramientas, «De Máquinas y Herramientas,» [En línea]. Available: <https://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/tipos-de-alambres-utilizados-con-soldadura-mig>. [Último acceso: 2019].
- [20] P. P. Ringegni, «Cálculo de uniones soldadas,» de *Mecanismo y elementos de máquinas*, 2013.
- [21] Trujillo, «Capacidad de pernos,» Web del profesor , 2015. [En línea]. Available: <http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/americanab/08-conexionesApernadas/8-9.html>.
- [22] F. S.A.S, «Catalogo de esparragos y tornilleria FEM,» de *Tornillería de calidad*, 2014.
- [23] I. T. M. Ing. Jorge Cisneros, «Informe de la definición y modelación del trazado, CAPITULO F,» Quito, 2016.

## **ANEXOS**

## ORDEN DE EMPASTADO