

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**“OPTIMIZACIÓN DEL MECANISMO DE ARTICULACIÓN DE
RODILLA MONOCÉNTRICA PARA PROTOTIPO DE PRÓTESIS
BIOMEATRÓNICA ”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA EN
MECATRÓNICA.**

LISETH VICTORIA PASAGUAYO BÁEZ

DIRECTOR: Dr. MARCO CIACCIA

Ibarra, Febrero 2017



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad. Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	10033763156		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Liseth Victoria Pasaguay Bález		
DIRECCIÓN:	Barrio Machángara, Calle Cacique Otavalo.		
EMAIL:	lvpasaguayob@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062-923816	TELÉFONO MÓVIL:	0969277884

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	OPTIMIZACIÓN DEL MECANISMO DE ARTICULACIÓN DE RODILLA MONOCÉNTRICA PARA PROTOTIPO DE PRÓTESIS BIOMECASTRÓNICA
AUTOR:	Liseth Victoria Pasaguay Bález
FECHA:	18/02/2017
PROGRAMA:	PREGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera en Mecatrónica
DIRECTOR:	Dr. Marco Ciaccia

AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Liseth Victoria Pasaguay Bález con cédula de identidad Nro. 1003763156, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrollo sin violar derechos de autores de terceros, por lo tanto la obra es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 18 días del mes de febrero del 2017



Firma

Nombre: Liseth Victoria Pasaguay Bález

Cédula: 1003763156



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, Liseth Victoria Pasaguayo Báez, con cédula de identidad Nro. 1003763156, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor (es) de la obra o trabajo de grado denominado: **OPTIMIZACIÓN DEL MECANISMO DE ARTICULACIÓN DE RODILLA MONOCÉNTRICA PARA PROTOTIPO DE PRÓTESIS BIOMECATRÓNICA**, que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, a los 18 días del mes de febrero del 2017

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Liseth Pasaguayo', is written over a horizontal line.

Firma

Nombre: Liseth Victoria Pasaguayo Báez

Cédula: 1003763156

DECLARACIÓN

Yo, **Liseth Victoria Pasaguayo Báez**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi 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 correspondientes a este trabajo, a la Universidad Técnica del Norte - Ibarra, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



Nombre: Liseth Victoria Pasaguayo Báez

Cédula: 1003763156

CERTIFICACIÓN

En calidad de tutor del trabajo de grado titulado: “OPTIMIZACIÓN DEL MECANISMO DE ARTICULACIÓN DE RODILLA MONOCÉNTRICA PARA PROTOTIPO DE PRÓTESIS BIOMECASTRÓNICA”, certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la señorita Liseth Victoria Pasaguayo Báez, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink that reads "Marco Ciaccia". The signature is written in a cursive style and is positioned above a solid horizontal line.

Dr. Marco Ciaccia

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Doy gracias a Dios por darme la fuerza y el coraje para terminar este trabajo de tesis, por ser mi guía siempre en momentos buenos y malos.

A mis padres Luis Rafael Pasaguayo y Rosa Báez por brindarme su apoyo incondicional durante todo este tiempo de formación, por sentar en mí las bases de responsabilidad y superación, por ser mi ejemplo de vida y guiarme por el camino de la perseverancia.

Pedro Andrés Heredia,

Por sus palabras de aliento, por creer en mi capacidad, por compartir estos momentos de mi vida y brindarme paciencia, comprensión, cariño y amor.

Al Doctor Marco Ciaccia, Director del Proyecto por ser mi guía e impartir sus conocimientos para finalizar con éxito mi trabajo.

Liseth Pasaguayo.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios y a mis padres, que han sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores lo cual hoy me ha permitido culminar esta etapa de mi vida con éxito.

A mis hermanas por siempre decirme “tú puedes ñaña”, palabras que han sido alentadoras para mí en momentos muy difíciles.

A Xavier Lima por compartir su valioso tiempo durante esta etapa de mi vida, por su apoyo incondicional personal y académico.

Liseth Pasaguayo.

RESUMEN

Una prótesis transfemoral debe cumplir con condiciones de diseño estrictas, debido a que la articulación de la rodilla es la más compleja del cuerpo humano; un aspecto importante para que una prótesis sea cómoda es su bajo peso y que soporte las exigencias de una marcha humana. La finalidad de este trabajo es optimizar el mecanismo de articulación de rodilla monocéntrica diseñado en la Universidad Técnica del Norte mediante un análisis estructural de esfuerzos no destructivo, comprobando a través de las deformaciones la correcta aplicación de las condiciones de contorno en un análisis de elementos finitos para el mejoramiento exitoso del mecanismo.

Se determinó las zonas de medición experimental de deformaciones en la prótesis de rodilla mediante un análisis inicial de elementos finitos; la fuerza de compresión aplicada en los ensayos y análisis de elementos finitos corresponde al peso de una persona de 65 kg y de carga máxima de la prueba estructural principal de la norma ISO 10328.

La prótesis de rodilla fue preparada con galgas extensométricas en diferentes puntos, se desarrolló un sistema de adquisición de las señales, filtrado y amplificación para el análisis de los resultados.

Las deformaciones se presentaron en las zonas previstas y las magnitudes obtenidas tuvieron un error máximo de 12,43 % y mínimo de 0,49 % con lo que se validó el modelo de elementos finitos. Este modelo se usó como base para crear modelos mejorados, con énfasis en la reducción del peso y una mejor distribución del factor de seguridad.

Los resultados obtenidos fueron un peso de 42,82 % menor y factores de seguridad mejor distribuidos, con una reducción de 37,9 % menor en la base y 44,37 % menor en el móvil.

ABSTRACT

A transfemoral prosthesis must comply with strict design conditions, because the knee joint is the most complex of the human body; an important aspect for a comfortable prosthesis is its low weight and that supports the demands of a human gait.

The purpose of this work is to optimize the mono-centric knee joint mechanism designed at the Universidad Técnica del Norte, through a non-destructive structural analysis of stresses, checking through the deformations the correct application of the contour conditions in a finite element analysis for the successful improvement of the mechanism. The zones of experimental measurement of deformations in the knee prosthesis were determined by an initial analysis of finite elements; the compression force applied in the tests and analysis of finite elements corresponds to the weight of a person of 65 kg and maximum load of the main structural test of ISO 10328.

The knee prosthesis was instrumented with strain gauges at different points, a system of acquisition of the filtered and amplification signals was developed for the analysis of the results.

The deformations were presented in the predicted areas and the magnitudes obtained had a maximum error of 12,43 % and a minimum of 0,49 %, with which the finite element model was validated. This model was used as a basis to create improved models, with emphasis on weight reduction and a better distribution of the safety factor.

The results obtained were a weight of 42.82 % lower and better distributed safety factors, with a reduction of 37.9 % lower in the base and 44.37 % lower in the mobile.

ÍNDICE GENERAL

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	II
AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD	III
CONSTANCIAS	III
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO	IV
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.....	IV
DECLARACIÓN	V
CERTIFICACIÓN.....	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT.....	X
ÍNDICE GENERAL.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XV
ÍNDICE DE FIGURAS	XVI
ÍNDICE DE ECUACIONES	XIX
INTRODUCCIÓN.....	1
EL PROBLEMA.....	1
OBJETIVO GENERAL.....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2

ANTECEDENTES	2
JUSTIFICACIÓN	4
ALCANCE.....	5
Capítulo 1	7
1. Marco Teórico	7
1.1. Análisis experimental de esfuerzos.....	7
1.1.1. Esfuerzo y Deformación.	7
1.1.2. Deformación unitaria.	8
1.1.3. Ensayos de tensión y de compresión.	8
1.1.4. Diagrama de esfuerzo deformación.....	9
1.2. Elementos finitos.....	10
1.3. Optimización estructural.....	11
1.4. Galgas extensométricas	11
1.4.1. Principio de funcionamiento de las galgas extensométricas.	11
1.4.2. Tipos de galgas extensométricas.....	12
1.5. Puente de Wheatstone	12
1.6. Prótesis de rodilla de tipo transfemoral.....	14
1.7. Norma ISO 10328	14
Capítulo 2	17
2. Metodología	17
2.1. Modelo geométrico del mecanismo de rodilla	17
2.2. Modelado y simulación del mecanismo.....	18
2.3. Aplicación de la fuerza y restricciones	20

2.4.	Criterio de selección de las galgas extensométricas	23
2.5.	Circuito de medición	23
2.6.	Acondicionamiento de la señal	23
2.7.	Adquisición y visualización de los datos.....	23
2.8.	Optimización del modelo	23
Capítulo 3		25
3.	Resultados	25
3.1.	Análisis de elementos finitos.....	25
3.2.	Selección de las galgas extensométricas.....	29
3.2.1.	Longitud de banda.....	29
3.2.2.	Modelo de la banda.	30
3.2.3.	Serie de la galga extensométrica.....	31
3.2.4.	Resistencia de la galga extensométrica.	31
3.2.5.	Número STC.....	31
3.3.	Instalación de las galgas extensométricas	31
3.3.1.	Preparación del material.....	31
3.3.2.	Pegado de las galgas extensométricas.....	32
3.3.3.	Soldado de los terminales de las galgas extensométricas.	32
3.3.4.	Protección de las galgas extensométricas.....	32
3.4.	Sistema de medición de deformaciones	32
3.4.1.	Diseño del circuito del puente de Wheatstone.....	33
3.4.2.	Deformación máxima de la galga extensométrica.....	33
3.4.3.	Deformaciones máximas del mecanismo.	34
3.5.	Procesamiento de la señal	34
3.6.	Sistema de adquisición de datos.....	36

3.7.	Visualización de datos	37
3.8.	Ensayo de compresión	38
3.9.	Programas en Labview® para la adquisición de las señales	38
3.10.	Ubicación del mecanismo de rodilla	41
3.11.	Visualización de los datos del ensayo	43
3.12.	Análisis de convergencia de los modelos de elementos finitos.....	45
3.13.	Análisis de resultados de los ensayos en la prótesis de rodilla.....	46
3.14.	Mejoramiento del modelo del mecanismo de rodilla.....	49
3.14.1.	Análisis del modelo original	49
3.14.2.	Modelo del mecanismo de rodilla mejorado.....	56
3.14.3.	Validación del factor de seguridad.....	62
3.15.	Análisis de costos del proyecto	68
3.15.1.	Costos directos de instrumentación.....	68
3.15.2.	Costos indirectos de instrumentación.....	68
3.15.3.	Costo total	69
Capítulo 4	71
4.	Conclusiones y recomendaciones	71
4.1.	Conclusiones.....	71
4.2.	Recomendaciones	71
Bibliografía	73

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS	12
TABLA 2.1. PROPIEDADES DEL ALUMINIO 7075.....	18
TABLA 2.2. PROPIEDADES DEL ACERO AISI 304.....	18
TABLA 2.3. PROPIEDADES DEL ACERO AISI 1018.....	18
TABLA 2.4. FUERZAS PARA EL ENSAYO DE COMPRESIÓN.	22
TABLA 3.1.DIMENSIONES DE LAS GALGAS SELECCIONADAS.....	30
TABLA 3.2. DATOS DE ESFUERZO DE UNA FUERZA DE 4483 N.....	45
TABLA 3.3. FUERZAS DEL ENSAYO Y SIMULACIONES.....	45
TABLA 3.4. DATOS DE DEFORMACIONES DE LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS.	48
TABLA 3.5. CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS OPTIMIZADOS.....	58
TABLA 3.6. COSTOS DIRECTOS DE INSTRUMENTACIÓN.	68
TABLA 3.7. COSTOS INDIRECTOS DE INSTRUMENTACIÓN.	68
TABLA 3.8. COSTOS TOTALES.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN PARA UN MATERIAL DÚCTIL.....	9
FIGURA 1.2. PROBLEMA ESTRUCTURAL, (A) MODELOS IDEALIZADO, (B) MODELO DE ELEMENTO FINITO.....	10
FIGURA 1.3. ESTRUCTURA DE LA GALGA EXTENSOMÉTRICA.	11
FIGURA 1.4. UN CUARTO DE PUENTE DE WHEATSTONE.....	13
FIGURA 1.5. PRÓTESIS DE RODILLA PARA AMPUTACIÓN TRANSFEMORAL, (A) AMPUTACIÓN TRANSFEMORAL, (B) PRÓTESIS TRANSFEMORAL, (C) PERSONA PROTETIZADA.	14
FIGURA 2.1. MODELO GEOMÉTRICO DEL MECANISMO DE RODILLA CON UNA FLEXIÓN DE 100	17
FIGURA 2.2. MECANISMO DE RODILLA CON LA BARRA SUSTITUTIVA CON UNA FLEXIÓN DE CERO GRADOS.....	19
FIGURA 2.3. VISTA ISOMÉTRICA DE LA APLICACIÓN DE LA FUERZA.....	20
FIGURA 2.4. RESTRICCIÓN DE LA BASE DEL MECANISMO DE RODILLA.	21
FIGURA 2.5. VISTA EXPLOSIONADA DEL MECANISMO DE RODILLA CON LOS CONTACTOS ENTRE COMPONENTES.	21
FIGURA 2.6. UBICACIÓN DE LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS, (A) VISTA POSTERIOR INCLINADA DEL MECANISMO, (B) VISTA FRONTAL INCLINADA DEL MECANISMO.	22
FIGURA 3.1. DISTRIBUCIÓN DE LOS ESFUERZOS EN LA PARTE MÓVIL.	25
FIGURA 3.2. DEFORMACIONES UNITARIAS DE LA PARTE MÓVIL.	26
FIGURA 3.3. FACTOR DE SEGURIDAD DE LA PARTE MÓVIL.	26
FIGURA 3.4. DISTRIBUCIÓN DE LOS ESFUERZOS EN LA BASE DEL MECANISMO.	27
FIGURA 3.5. DEFORMACIONES UNITARIAS DE LA BASE DEL MECANISMO	27
FIGURA 3.6. FACTOR DE SEGURIDAD DE LA BASE DEL MECANISMO.	28
FIGURA 3.7. BARRA SUSTITUTIVA DEL ACTUADOR.	28
FIGURA 3.8. DEFORMACIÓN DE LA GALGA CON RESPECTO A LA ZONA DE LA GRILLA.	29
FIGURA 3.9. DIMENSIONES DE UNA GALGA EXTENSOMÉTRICA.	30
FIGURA 3.10. PUENTE DE WHEATSTONE CON UNA GALGA.	33
FIGURA 3.11. CIRCUITO AMPLIFICADOR DE LA SEÑAL.	35
FIGURA 3.12. VISTA SUPERIOR DEL CIRCUITO PCB PARA LA ADQUISICIÓN DE LAS SEÑALES DE LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS.....	36
FIGURA 3.13. UBICACIÓN DE SENSORES EN EL MECANISMO.	37
FIGURA 3.14. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL.....	38
FIGURA 3.15. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA EL RANGO MÁXIMO DE VOLTAJE.....	39
FIGURA 3.16. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA PARA ADQUISICIÓN DE DATOS.	40
FIGURA 3.17. INTERFAZ DE USUARIO PARA LAS CURVAS DE VOLTAJE MÁXIMO.....	40
FIGURA 3.18. INTERFAZ DE USUARIO PARA VISUALIZACIÓN DE LAS CURVAS DE DEFORMACIÓN.	41

FIGURA 3.19. ESQUEMA DE LOS COMPONENTES DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSALES.	42
FIGURA 3.20. UBICACIÓN DEL MECANISMO EN LA MÁQUINA DE ENSAYOS.	43
FIGURA 3.21. POSICIÓN INICIAL DEL MECANISMO, $F=0$ N	43
FIGURA 3.22. APLICACIÓN DE LA FUERZA DIFERENTE DE 0 N	44
FIGURA 3.23. VISUALIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL MECANISMO Y LAS CURVAS DE LAS SEÑALES.....	44
FIGURA 3.24. UBICACIÓN DEL SENSOR DE LA GALGA EXTENSOMÉTRICA 6.....	46
FIGURA 3.25. CURVA DE DEFORMACIONES EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE LA GALGA EXTENSOMÉTRICA 6.	47
FIGURA 3.26. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LA BASE.	50
FIGURA 3.27. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LA BASE, (A) VISTA ISOMÉTRICA DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS DE LA BASE, (B) DETALLE DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LA BASE.....	51
FIGURA 3.28. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS RANURAS, (A) VISTA ISOMÉTRICA DE LA BASE CON INFORMACIÓN DE LAS RANURAS, (B) DETALLE DE LA DISTRIBUCIÓN DEL ESFUERZO EN LAS RANURAS.	51
FIGURA 3.29. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICAS, (A) VISTA FRONTAL DE LA BASE CON INFORMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICAS, (B) DETALLE DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICAS.	52
FIGURA 3.30. DISTRIBUCIÓN DE LOS ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICA (A) VISTA ISOMÉTRICA DE LA BASE CON INFORMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICA, (B) DETALLE DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICA.	53
FIGURA 3.31. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICA, (A) VISTA DERECHA CON INFORMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICA, (B) DETALLE DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICA.	53
FIGURA 3.32. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN EL MÓVIL.....	54
FIGURA 3.33. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICA, (A) DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICA VISTA SUPERIOR, (B) DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICA VISTA DERECHA.....	54
FIGURA 3.34. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICA, (A) DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICA - VISTA ISOMÉTRICA, (B) DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICA – VISTA FRONTAL	55
FIGURA 3.35. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICA, (A) DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICA – VISTA POSTERIOR, (B) DETALLE DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICA – VISTA INFERIOR.....	55
FIGURA 3.36. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN GEOMÉTRICA - VISTA POSTERIOR INCLINADA HACIA LA IZQUIERDA	56

FIGURA 3.37. MODELOS MEJORADOS, (A) MODELO A, (B) MODELO B Y (C) MODELO C	56
FIGURA 3.38. MÓVIL MEJORADO.	57
FIGURA 3.39. REDUCCIÓN DEL MATERIAL EN LA BASE, (A) CORTE DEL ESPESOR EXTERNO, (B) CORTE DEL ESPESOR INTERNO, (C) CORTE DE LOS SOPORTES DEL PASADOR 2	58
FIGURA 3.40. REDONDEOS DEL MECANISMO OPTIMIZADO, (A).VISTA ISOMÉTRICA, (B) VISTA FRONTAL INCLINADA HACIA LA DERECHA.	59
FIGURA 3.41. REDUCCIÓN DEL MATERIAL DE LAS RANURAS LATERALES.	59
FIGURA 3.42. REDUCCIÓN DEL ESPESOR DEL MÓVIL, (A) CORTE VISTA POSTERIOR, (B) CORTE VISTA ISOMÉTRICA POSTERIOR, (C) CORTE VISTA FRONTAL, (D) CORTE FRONTAL -VISTA ISOMÉTRICA FRONTAL.....	60
FIGURA 3.43. AUMENTO DEL RADIO DE REDONDEO EN CONCENTRADORES DE ESFUERZO, (A) ARISTAS EXTERNAS VISTA ISOMÉTRICA INFERIOR, (B) AUMENTO DE REDONDEOS EN LAS ARISTAS EXTERNAS VISTA ISOMÉTRICA INFERIOR, (C) ARISTAS INTERNAS VISTA ISOMÉTRICA INFERIOR, (D) AUMENTO DE REDONDEOS EN LAS ARISTAS INTERNAS VISTA ISOMÉTRICA INFERIOR.	61
FIGURA 3.44. REDONDEOS EXTERNOS DE ARISTAS VIVAS EN EL MÓVIL. (A) ARISTAS SUPERIORES VISTA ISOMÉTRICA SUPERIOR, (B) REDONDEOS EN LAS ARISTAS VIVAS VISTA ISOMÉTRICA SUPERIOR, (C) ARISTAS INFERIORES VISTA ISOMÉTRICA SUPERIOR, (D) REDONDEOS EN LAS ARISTAS INFERIORES VISTA ISOMÉTRICA SUPERIOR.....	61
FIGURA 3.45. REDONDEOS INTERNOS DE ARISTAS VIVAS EN EL MÓVIL. (A) ARISTAS INTERNAS VISTA ISOMÉTRICA INFERIOR, (B) REDONDEOS EN LAS ARISTAS INTERNAS VISTA ISOMÉTRICA INFERIOR, (C) ARISTAS INTERNAS VISTA ISOMÉTRICA INFERIOR, (D) REDONDEOS EN LAS ARISTAS INTERNAS VISTA ISOMÉTRICA INFERIOR.....	62
FIGURA 3.46. ANÁLISIS DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE LA BASE DEL MODELO ORIGINAL- VISTA 1.	63
FIGURA 3.47. ANÁLISIS DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE LA BASE DEL MODELO OPTIMIZADO - VISTA 1.	63
FIGURA 3.48. ANÁLISIS DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE LA BASE DEL MODELO ORIGINAL- VISTA 2.	64
FIGURA 3.49. ANÁLISIS DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE LA BASE DEL MODELO OPTIMIZADO- VISTA 2.	64
FIGURA 3.50. ANÁLISIS DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL MÓVIL DEL MODELO ORIGINAL- VISTA 1.....	65
FIGURA 3.51. ANÁLISIS DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL MÓVIL DEL MODELO OPTIMIZADO - VISTA 1.	65
FIGURA 3.52. ANÁLISIS DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL MÓVIL DEL MODELO ORIGINAL- VISTA 2.....	66
FIGURA 3.53. ANÁLISIS DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL MÓVIL DEL MODELO OPTIMIZADO - VISTA 2.	66
FIGURA 3.54. ANÁLISIS DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL MÓVIL DEL MODELO ORIGINAL- VISTA 3.....	67
FIGURA 3.55. ANÁLISIS DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL MÓVIL DEL MODELO OPTIMIZADO - VISTA 3.	67

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1.1. FÓRMULA PARA EL CÁLCULO DEL ESFUERZO.....	7
ECUACIÓN 1.2. DEFORMACIÓN UNITARIA	8
ECUACIÓN 1.3. RELACIÓN DE VARIACIÓN DE RESISTENCIA.	12
ECUACIÓN 1.4. VOLTAJE DE SALIDA DEL PUENTE CON 4 RESISTENCIAS.	13
ECUACIÓN 1.5. CÁLCULO DE LA SALIDA DEL PUENTE.	13
ECUACIÓN 1.6. SUSTITUCIÓN DE LAS RESISTENCIAS.....	13
ECUACIÓN 1.7. VOLTAJE DE SALIDA DEL PUENTE DE WHEATSTONE.	14
ECUACIÓN 2.1. ECUACIÓN DE RIGIDEZ PARA FUERZAS DE COMPRESIÓN Y TENSIÓN.....	19

INTRODUCCIÓN

EL PROBLEMA

Las personas con amputación transfemoral consumen hasta un 50% más de energía metabólica que las personas sin discapacidad, a pesar de que los amputados tienen menos músculos según los autores (Rarick et al ., 2014). Y según (Au & Herr, 2008), entre 10% a 60% más energía metabólica consumida que las personas que tienen el miembro real, esto implica grandes diferencias en función entre prótesis y extremidades naturales, dependiendo de la velocidad de marcha, el estado físico de la persona, la causa de la amputación, el nivel de amputación, y las características de la prótesis. Además, los amputados caminan entre un 10% y un 40% más lento que las personas intactas

Las personas protetizadas, para evitar consumir más energía metabólica, necesitan prótesis mecatrónicas que permitan realizar la marcha humana con mayor control y brinden mejor calidad de vida. Según (Torrealba, Zambrano, & Messingher, 2012), un aspecto importante para que una prótesis sea cómoda es su peso.

Un primer mecanismo de articulación de rodilla fue desarrollado por (Lima Trujillo , 2015) en la Universidad Técnica del Norte, se concluye, pesa 1760 g para una persona de 65 kg, en comparación con otras prótesis indica que es muy pesada, por ejemplo, el grupo (OTTOBOCK, 2012) tiene modelos de prótesis de rodilla básicos que pesan entre 630 g y 750 g para una persona de 100 kg, 760 g y 896 g para una persona de 125 kg y modelos más avanzados que pesan entre 360 g y 1.240 g para una persona de 150 kg, y 1.147 g para una persona de 136 kg. Según la empresa (ÖSSUR, 2012) tiene modelos de prótesis avanzados que van desde 1.520 g para una persona de 136 kg, 1.140 g para una persona de 136 kg, 1.211 g para una persona de 166 kg y modelos básicos desde 675 g y 690 g para una persona de 100 kg.

Para la solución de este problema se propone mejorar el mecanismo de articulación de rodilla para prótesis externa biomecatrónica desarrollado por (Lima Trujillo , 2015) sin afectar la seguridad del mecanismo la cual se evaluará sometiéndolo a esfuerzos por condiciones de carga máxima de la prueba estructural principal de la norma ISO 10328. Además mediante un método

de análisis experimental de esfuerzos que en la actualidad se aplica a través de un enfoque directo para la resolución de problemas mecánicos estructurales como alternativa y metodología complementaria a la teoría (Freddi, Olmi, & Cristofolini, 2015), se medirán las deformaciones unitarias que se producen mediante galgas extensométricas.

OBJETIVO GENERAL

Mejorar el desempeño mecánico de un mecanismo de articulación de rodilla monocéntrica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calibrar el modelo de elementos finitos mediante la determinación experimental de deformaciones en el prototipo del mecanismo de rodilla monocéntrica.
- Mejorar el diseño del mecanismo de rodilla monocéntrica con énfasis en la reducción de peso y uniformización de la distribución de factor de seguridad.
- Aplicar las mejoras al modelo del mecanismo de rodilla monocéntrica.

ANTECEDENTES

La pérdida de una extremidad puede empeorar seriamente la calidad de vida de cualquier persona. La capacidad de un paciente con amputación inferior a la rodilla para realizar las tareas de la marcha humana es mejor que un paciente amputado por encima de la rodilla, esto refleja la importancia de la rodilla en la locomoción humana según los autores (García, Araújo, Ferreira, & Oliveira, 2008). Por esta razón una prótesis debe ser sometida a pruebas de funcionamiento antes de ser manufacturada ya que es importante conocer las causas y efectos que ponen en riesgo el correcto funcionamiento de un diseño de prótesis.

El Centro de Biomecánica de la Universidad de Carabobo (CEBIOMECA-UC) propone el diseño de una prótesis externa de rodilla con sistema de frenado, la finalidad es presentar el diseño de una prótesis de rodilla a partir de la evaluación numérica de la distribución de cargas que se presentan bajo los patrones de la marcha o el caminar, usando el método de los elementos finitos (MEF), las condiciones de carga fueron simuladas y evaluadas con el programa ABAQUS, en general el diseño de prótesis se comporta satisfactoriamente ya que se mantiene en el rango elástico de los materiales seleccionados, el diseño de prótesis se muestra en la figura 1.

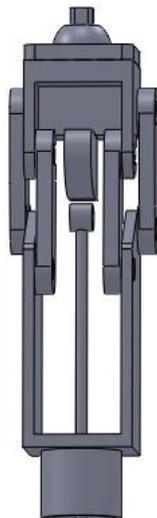


Figura 1. Prótesis externa con sistema de frenado (Cardona & Oropeza, 2012)

En el trabajo de Belkys Amador, Müller-Karger y Torrealba Rafael del Grupo de Biomecánica de la Universidad Simón Bolívar y el Laboratorio de Prototipos de la Universidad Nacional Experimental del Táchira realizaron la rectificación estructural en el diseño de prótesis policéntrica de rodilla utilizando elementos finitos. El diseño incluyó el dimensionamiento cinemático y estructural del mecanismo, el mismo que está conformado por 5 eslabones y 4 ejes que fueron simulados bajo las condiciones I y II de carga máxima de la prueba estructural principal de la norma ISO 10328, pero no se realizaron ensayos de compresión, solo se redimensionaron los ejes con los resultados obtenidos en la simulación.

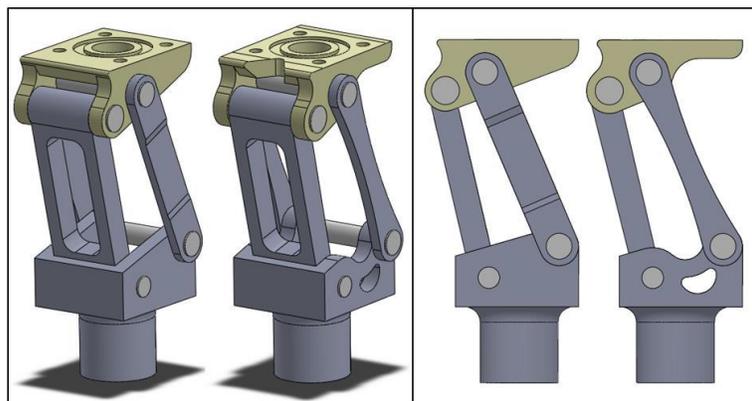


Figura 2. Prótesis policéntrica de 4 barras. (Amador, Müller, & Torrealba, 2014)

En el año 2012, Torrealba Rafael, Zambrano Lilibeth, Messinger Gabriel del Grupo de Biomecánica, Universidad Simón Bolívar y departamento de Ciencias y Técnicas de la Construcción, Universidad Metropolitana desarrollaron la optimización del chasis de una exoprótesis de rodilla utilizando la interacción directa entre programas de diseño en 3D y análisis de esfuerzos por MEF, buscando una reducción del peso de la prótesis para disminuir la carga que ésta representa para el paciente al caminar. Se mejoró dicho diseño, y al mismo tiempo que se optimizó su peso para los niveles de carga de la norma ISO, el proceso de optimización permitió reducir el peso de la prótesis de 2104 g del prototipo anterior a 1.750 g en este nuevo prototipo. El diseño de la prótesis a optimizar se muestra en la figura 3.

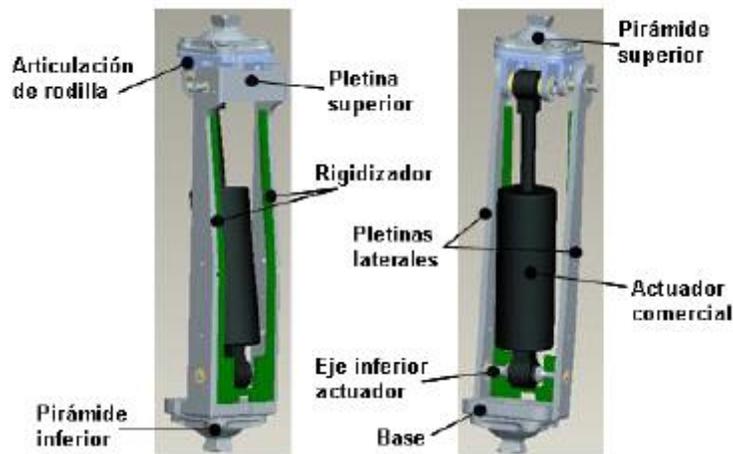


Figura 3. Chasis de una exoprótesis de rodilla. (Torrealba , Zambrano , & Messinger , 2012)

JUSTIFICACIÓN

En este momento en nuestro país no se está fabricando prótesis biomecánicas de ningún tipo, esto obliga a importar con elevados costos, que van desde los 700 a 95.000 dólares, según (Schapiro, 2011). Aprovechando que ya existe un prototipo de prótesis de rodilla en la Universidad Técnica del Norte se pretende realizar un análisis experimental de esfuerzos para mejorar el modelo del mecanismo de la prótesis de rodilla, considerando la resistencia del mecanismo cuando es sometido a esfuerzos según la condición I de carga máxima de la prueba estructural principal de la norma ISO 10328.

En el aspecto social, mejorar el peso, modelo, diseño y estructura de un mecanismo contribuye a reducir la energía metabólica consumida en la marcha humana y mejora la calidad de vida de las personas protetizadas, resultado que se encuentra de acuerdo con el artículo 47 de la constitución de la República del Ecuador.

Al obtenerse un mecanismo de rodilla mejorado se estará dando un paso en dirección a la producción nacional de prótesis de rodillas, creando tecnología propia y contribuyendo con la transformación de la matriz productiva del país.

ALCANCE

Se partirá del mecanismo de articulación de rodilla para prototipo de prótesis externa biomecatrónica desarrollado por (Lima Trujillo , 2015), realizado en la Universidad Técnica del Norte el cuál se instrumentará con galgas extensométricas para determinar experimentalmente las deformaciones que se producen en el mecanismo cuando es sometido a compresión.

Las galgas extensométricas se fijarán en diferentes puntos con mayor nivel de esfuerzos para medir las deformaciones unitarias que se producen en el mecanismo al realizar el ensayo de compresión.

El mecanismo de prótesis de rodilla será sometido a 4 ensayos de compresión, en el primer ensayo se aplicará la fuerza de 637 N correspondiente a una persona de 65 kg, y en los tres ensayos restantes se aplicará las cargas para una prueba estática según la norma ISO 10328, de la que se tomará los valores de la condición I de la categoría P5, donde la mínima fuerza del ensayo a aplicar es 2240 N, el nivel inferior del límite de carga es 3360 N y el nivel superior de carga es 4480 N.

Se aplicará las mejoras al modelo del mecanismo de articulación de rodilla para reducir el peso y uniformización de factor de seguridad.

Para la adquisición y visualización de los datos de las señales obtenidos por las galgas extensométricas se realizará una interfaz gráfica mediante el Software Labview® y una tarjeta de adquisición de datos.

Capítulo 1

1. Marco Teórico

1.1. Análisis experimental de esfuerzos

Se entiende por análisis experimental de esfuerzos un procedimiento consistente en la medición de deformaciones y deflexiones de la estructura real o de un modelo físico de ella. El análisis experimental puede basarse en comportamiento elástico o inelástico de la estructura. (Reglamento de Construcciones Sismorresistentes Nsr98 Tomo Uno, 1998).

Existen varios métodos para realizar el análisis experimental de esfuerzos, entre ellos estos barnices frágiles, extensometría fotoelástica, líneas de Moire, extensometría eléctrica y extensometría mecánica. Los mismos son destinados a determinar experimentalmente los desplazamientos y deformaciones en determinadas regiones de las piezas cuando son sometidas a causas deformantes que pueden expresarse en términos de fuerza. (Persico, 2016)

1.1.1. Esfuerzo y Deformación.

“El esfuerzo (σ) se define como la carga por unidad de área (o unidad de carga), el cual, para la tensión del espécimen”. (Norton , 2008), se calcula como:

Ecuación 1.1. Fórmula para el cálculo del esfuerzo (Norton , 2008)

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

Donde P es la carga aplicada en cualquier instante y A_0 es el área transversal original de la muestra.

Un cuerpo tiende a cambiar su forma y tamaño cuando se le aplica una fuerza. Estos cambios se conocen como deformaciones, las cuales puede ser muy visibles o casi imperceptibles. La deformación de un cuerpo también puede ocurrir cuando cambia su temperatura. La deformación de un cuerpo no será uniforme en todo su volumen, por lo que el cambio en la geometría de cualquier segmento de línea dentro del cuerpo puede variar de forma considerable a lo largo de su longitud. (Russell, 2008).

1.1.2. Deformación unitaria.

Se denomina deformación unitaria (*strain*) al desplazamiento por unidad de longitud o cambio fraccional de longitud que experimenta un cuerpo cuando se le aplica una fuerza, y se representa por el símbolo ε . La deformación unitaria puede ser tanto extensiva (positiva) como compresiva (negativa). (Mercedes & Mediavilla, 2010).

Ecuación 1.2. Deformación Unitaria (Mercedes & Mediavilla, 2010)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

La deformación unitaria es adimensional, pero se suele expresar en unidades de mm/mm. Para la mayoría de los metales las deformaciones unitarias que se miden experimentalmente son típicamente menores de 0,005 mm/mm. Puesto que los valores de las deformaciones unitarias son tan pequeños, se expresan generalmente en microdeformaciones. Una microdeformación es igual a $1\mu\varepsilon = 10^{-6}\varepsilon$ (Mercedes & Mediavilla, 2010).

1.1.3. Ensayos de tensión y de compresión.

La resistencia de un material depende de su capacidad para soportar una carga sin presentar deformación o falla, es propia de cada material y debe determinarse mediante la experimentación. En un ensayo de tensión o compresión se puede establecer varias propiedades mecánicas importantes de un material. (OMEGA, 2016)

“El análisis experimental esfuerzos utiliza los valores de tensión medidos en la superficie o en alguna parte estructural del cuerpo, para predecir su seguridad y la resistencia”. (OMEGA, 2016).

1.1.4. Diagrama de esfuerzo deformación.

La deformación unitaria y el esfuerzo están relacionados; si los valores de σ y ϵ se trazan de manera que el eje vertical sea el esfuerzo y el eje horizontal sea la deformación, la curva resultante se llama diagrama de esfuerzo-deformación. Los diagramas de esfuerzo-deformación para un material particular serán muy similares pero nunca exactamente iguales. En la figura 1.1 se indica la curva esfuerzo deformación y el comportamiento en cada nivel.

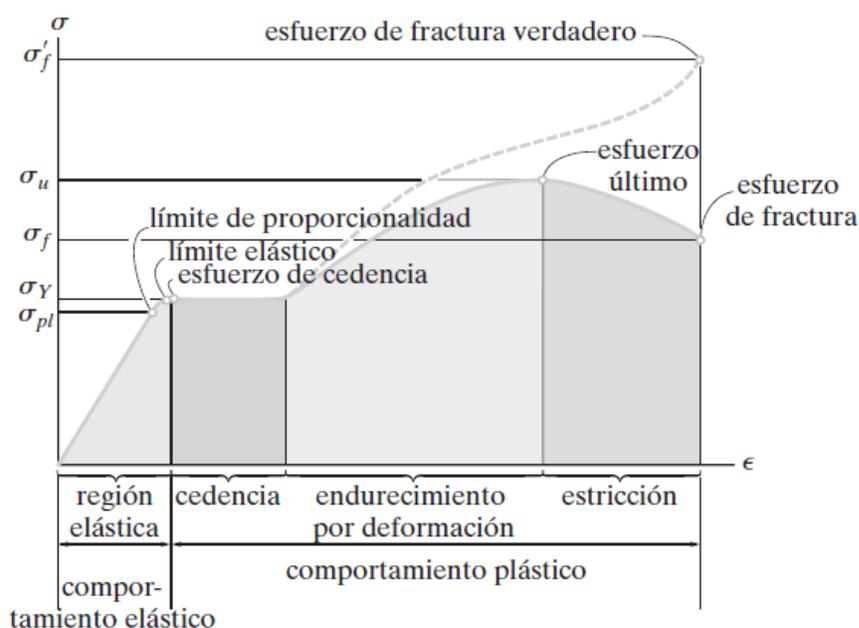


Figura 1.1. Diagrama Esfuerzo deformación para un material dúctil (Russell, 2008)

El comportamiento elástico del material se produce cuando las deformaciones en la probeta están dentro de la región triangular que se muestra en la figura 1.1. La curva en la mayor parte de la región en realidad es una línea recta, por lo que el esfuerzo es proporcional a la deformación. El límite superior del esfuerzo para esta relación lineal se denomina límite de proporcionalidad, σ_{pl} . Si el esfuerzo excede ligeramente el límite de proporcionalidad, la curva tiende a doblarse y aplanarse. Esto continúa hasta que el esfuerzo alcanza el límite elástico, si en este punto se retira la carga, la probeta recuperará de nuevo su forma original. (Russell, 2008)

Dentro del comportamiento plástico se encuentra la cedencia, endurecimiento por estricción y estricción, estos no son temas de interés para este trabajo ya que el mecanismo de prótesis se ensayará dentro del límite elástico.

1.2. Elementos finitos

Los componentes mecánicos en forma de vigas, barras simples, etc., se pueden analizar con bastante facilidad por medio de métodos básicos de la mecánica que proporcionan soluciones aproximadas. En la realidad los componentes, en su mayoría son complejos por lo que se requiere realizar experimentación o métodos numéricos para analizarlos. (Shigley, 2008).

Los métodos numéricos permiten tener una solución aproximada del comportamiento de un modelo en la realidad, pero por ser una técnica numérica puede producir errores computacionales y de conversión discreta.

“Un componente mecánico real es una estructura elástica continua. El análisis de elementos finitos (FEA) divide (“discretiza”), la estructura en pequeñas subestructuras (elementos) de tipo elástico, bien definidas pero finitas”. (Shigley, 2008).

En la figura 1.2 se muestra un ejemplo de conversión de valores continuos a valores discretos.

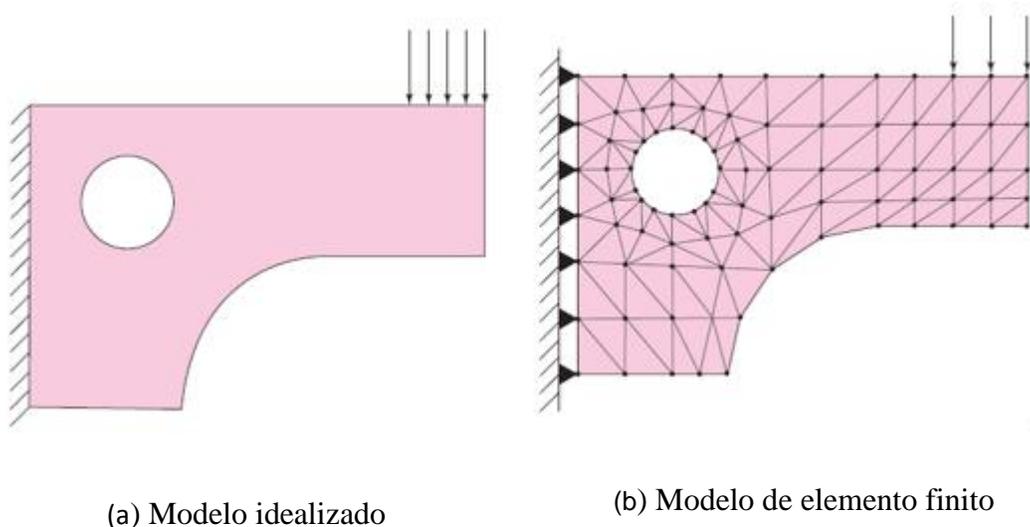


Figura 1.2. Problema estructural, (a) modelos idealizado, (b) modelo de elemento finito (Shigley, 2008)

1.3. Optimización estructural

La optimización estructural es un campo de investigación que busca integrar y desarrollar metodologías que permitan encontrar nuevos diseños, basados en la modificación de la forma de las estructuras, cumpliendo con criterios tales como: menor concentración de esfuerzo, vibraciones mecánicas, temperaturas, reducción de peso, factor de seguridad, etc., y que a su vez se fabriquen con la menor cantidad de material. (Lozano, Velázquez, & Zepeda, 2010).

1.4. Galgas extensométricas

Las galgas extensométricas o *strain gages* son transductores de fuerza que se basan en la variación de la resistencia de un conductor o semiconductor cuando se someten a un esfuerzo mecánico. (Mercedes & Mediavilla, 2010), están formadas por un hilo muy fino y distribuido en varios tramos en paralelo como se muestra en la figura 1.1.

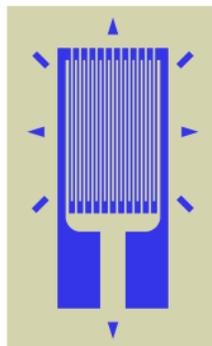


Figura 1.3. Estructura de la Galga extensométrica. (Drang, 2010)

1.4.1. Principio de funcionamiento de las galgas extensométricas.

Las galgas extensométricas son sensores cuya resistencia cambia, cuando se aplica fuerzas de compresión, tensión, tracción o torsión. Su funcionamiento se basa en el cambio de resistencia eléctrica que sufre un hilo conductor al variar su longitud cuando se aplica una fuerza, tensión, presión, peso, etc. (Gálvez Díaz-Rubio, 2004).

“Cada metal tiene resistencia específica. Una fuerza externa tensora aumenta la resistencia por alargamiento, una fuerza compresiva disminuye la resistencia por contracción. La resistencia

original es R y una variación de la resistencia a la deformación es ΔR ". (Kyowa, 2011). Entonces la relación entre la variación de la resistencia y la deformación se muestra en la ecuación 1.3.

Ecuación 1.3. Relación de variación de resistencia.

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \frac{\Delta L}{L} = K_s \cdot \varepsilon$$

Donde K_s es el factor de galga es decir el coeficiente que expresa la sensibilidad de la galga y ε es la deformación.

1.4.2. Tipos de galgas extensométricas.

Los tipos de galgas extensométricas incluyen las galgas metálicas o de hilo de lámina y las semiconductoras. En la tabla 1.1 se muestra las características de estos dos tipos.

Tabla 1.1. Características típicas de las galgas extensométricas (Mercedes & Mediavilla, 2010)

Parámetro	Metálica o de hilo de lámina	Semiconductora
Margen de medida ($\mu\varepsilon$)	0,1 a 40000	0,001 a 3000
Factor de sensibilidad	1,8 a 2,35	50 a 200
Resistencia (Ω)	120,350,600.....,5000	1000 a 5000
Tolerancia de resistencia (%)	0,1 a 0,2	1 a 2
Tamaño (mm)	0,4 a 150 estándar:3 a 6	1 a 5

1.5. Puente de Wheatstone

“El puente de Wheatstone es una configuración de cuatro resistencias, que convierte las variaciones de resistencias demasiadas pequeñas en valores de voltajes.” (Rodríguez, 2012).

Al aplicar una determinada fuerza en una galga extensométrica, la grilla se deforma produciendo una variación en su resistencia, dependiendo el valor de la fuerza que se aplique cambia la resistencia. Para obtener los datos enviados por las galgas extensométricas se utiliza un puente de Wheatstone, que transforma las variaciones de resistencia en variaciones de voltaje.

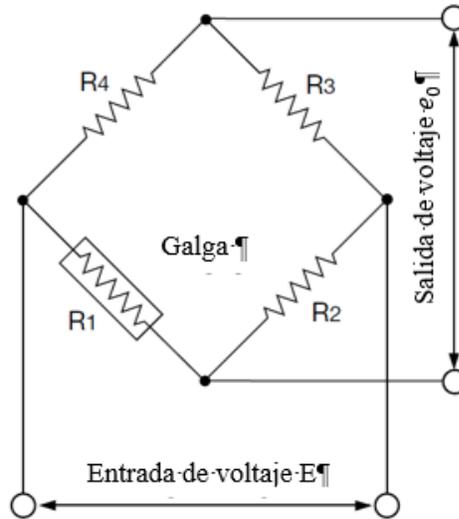


Figura 1.4. Un cuarto de puente de Wheatstone (Kyowa, 2011)

Para obtener el voltaje de salida del puente e_0 , las resistencias (Ω) son R_1 , R_2 , R_3 , y R_4 , el voltaje del puente es E , entonces:

Se emplea la ecuación. 1.4

Ecuación 1.4. Voltaje de salida del puente con 4 resistencias. (Kyowa, 2011)

$$e_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} * E$$

R_1 , representa la galga extensométrica y E el voltaje de entrada entonces el voltaje de salida del puente se calcula con la ecuación 1.5, (Kyowa, 2011).

Ecuación 1.5. Cálculo de la salida del puente.

$$e_0 = \frac{(R_1 + \Delta R)R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + \Delta R + R_2)(R_3 + R_4)} * E$$

Si $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, sustituyendo en la ecuación 1.5 se obtiene la ecuación 1.6 de (Kyowa, 2011)

Ecuación 1.6. Sustitución de las resistencias.

$$e_0 = \frac{(R^2 + R\Delta R) - R^2}{(2R + \Delta R)2R} * E$$

Simplificando la ecuación.1.6 se obtiene la ecuación 1.7.

Ecuación 1.7. Voltaje de salida del puente de Wheatstone. (Kyowa, 2011)

$$e_0 = \frac{1}{4} * \frac{\Delta R}{R} * E = \frac{1}{4} * K_s * \varepsilon * E$$

Con la ecuación 1.7 se obtiene el voltaje de salida que es proporcional a un cambio en la resistencia, es decir, un cambio en la longitud.

1.6. Prótesis de rodilla de tipo transfemoral

“Las prótesis de tipo transfemoral son mecanismos que sustituyen las funciones del miembro inferior a nivel del muslo, proporcionando funcionalidad, estabilidad, confort y seguridad.” (Ministerio de sanidad y consumo, 2003).

“Para el paciente, la amputación transfemoral es reemplazada por una prótesis que incluye una articulación de rodilla, la misma que debe moverse como la articulación normal.” (Inaort, 2011)

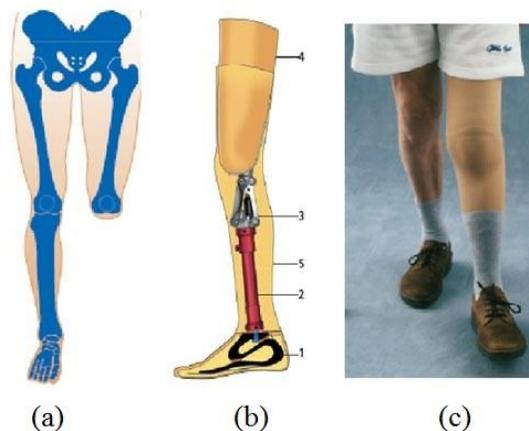


Figura 1.5. Prótesis de rodilla para amputación transfemoral, (a) amputación transfemoral, (b) prótesis transfemoral, (c) persona protetizada. (Ortopedia Centroamericana)

1.7. Norma ISO 10328

Esta norma internacional especifica los procedimientos a seguir en los ensayos de resistencia estática y cíclica de las prótesis de miembros inferiores que, normalmente, producen cargas combinadas mediante la aplicación de una fuerza de ensayo única. Las cargas combinadas en la

probeta corresponden a los valores máximos de los componentes de carga que normalmente se producen en diferentes momentos durante la postura de marcha.

Los ensayos descritos en esta norma internacional se aplican a tipos específicos de prótesis tales como, prótesis por desarticulación del tobillo, prótesis por amputación tibial (por debajo de la rodilla), prótesis por desarticulación de la rodilla y amputación femoral (por encima de la rodilla), y prótesis por desarticulación de la parte distal (inferior) de la cadera y prótesis por hemipelvectomía (International Organization for Standardization, 2006).

Capítulo 2

2. Metodología

2.1. Modelo geométrico del mecanismo de rodilla

El modelo geométrico que se usará para la optimización se muestra en la figura 2.1, donde los 100 grados corresponden a una flexión de 0 grados en la rodilla, los material que se aplicarán en el análisis de elementos finitos son aleación de aluminio 7075 T6 para la base y el móvil y para los pasadores acero AISI 304. El mecanismo original pesa 989,06 g sin tomar en cuenta el actuador.

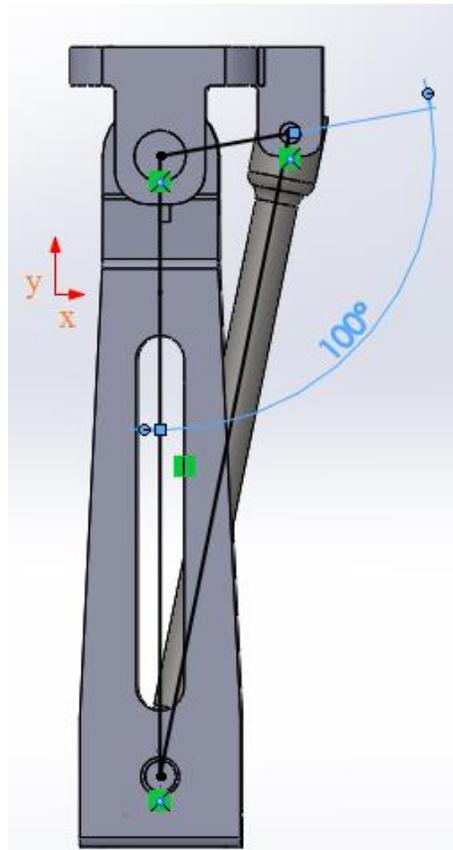


Figura 2.1. Modelo geométrico del mecanismo de rodilla con una flexión de 100

Las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 7075 T6, acero AISI 304 y acero AISI 1018 se muestran en las tablas 2.1, 2.2 y 2.3 respectivamente.

Tabla 2.1. Propiedades del aluminio 7075.

Propiedades	Valor	Unidades
Módulo elástico	72	GPa
Coefficiente de Poisson	0,33	Adimensional
Módulo cortante	26,9	GPa
Densidad de masa	2810	Kg/m ³
Límite de tracción	570	MPa

Tabla 2.2. Propiedades del acero AISI 304.

Propiedades	Valor	Unidades
Módulo elástico	190	GPa
Coefficiente de Poisson	0,29	Adimensional
Módulo cortante	75	GPa
Densidad de masa	8000	Kg/m ³
Límite de tracción	517,02	MPa
Límite elástico	206,81	MPa

Tabla 2.3. Propiedades del acero AISI 1018.

Propiedades	Valor	Unidades
Módulo elástico	200	GPa
Coefficiente de Poisson	0,29	Adimensional
Módulo cortante	78	GPa
Densidad de masa	7870	Kg/m ³
Límite de tracción	440	MPa
Límite elástico	370	MPa

2.2. Modelado y simulación del mecanismo

Para determinar las zonas de medición experimental de deformaciones se realiza el estudio del comportamiento del mecanismo cuando se aplica fuerzas de compresión, como el peso de la persona y las condiciones de carga máxima de la prueba estructural principal de la norma ISO 10328, utilizando un modelo inicial de elementos finitos basado en el diseño original del mecanismo de rodilla.

Barra que reemplaza el actuador.

Para realizar el análisis de elementos finitos se reemplaza el actuador por una barra de acero AISI 1018 como se muestra en la figura 2.2, que tiene las dimensiones adecuadas para que la prótesis tenga una flexión de cero grados.

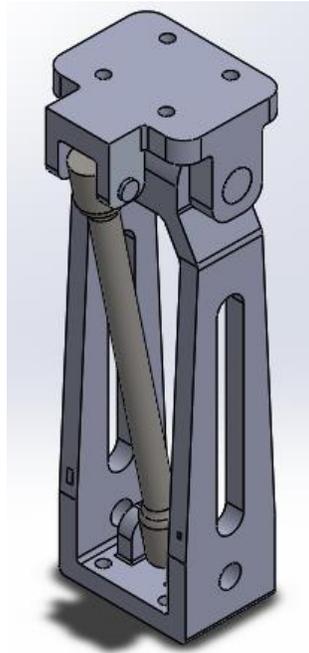


Figura 2.2. Mecanismo de rodilla con la barra sustitutiva con una flexión de cero grados.

La barra no debe alterar el comportamiento mecánico del mecanismo, debe tener las mismas características mecánicas del actuador.

Se determinará la rigidez del tornillo sin fin del actuador tomando en consideración el módulo de Young del material constitutivo del mismo que corresponde a un acero con un valor de 207 GPa , el diámetro del tornillo sin fin corresponde a 12 mm y la longitud de la barra corresponde a $204,61\text{ mm}$, utilizando la ecuación 2.1 se establece que la rigidez del tornillo sin fin es $132,42 \times 10^6\text{ N/m}$.

Ecuación 2.1. Ecuación de rigidez para fuerzas de compresión y tensión. (Shigley, 2008)

$$K = \frac{E * A}{L}$$

Se utilizará para la barra sustitutiva el material acero AISI 1018 que tiene un módulo de elasticidad de 205 GPa , se utilizará la longitud anterior y se determinará el diámetro de la barra utilizando la rigidez del tornillo sin fin. Obteniendo un diámetro de 13mm.

2.3. Aplicación de la fuerza y restricciones

En la simulación mediante elementos finitos se aplican las mismas fuerzas a las que será sometido el mecanismo de rodilla durante el ensayo de compresión. De igual manera, se realizará la simulación con los elementos mecánicos que se van a ensayar experimentalmente, como se muestra en la figura 2.3.

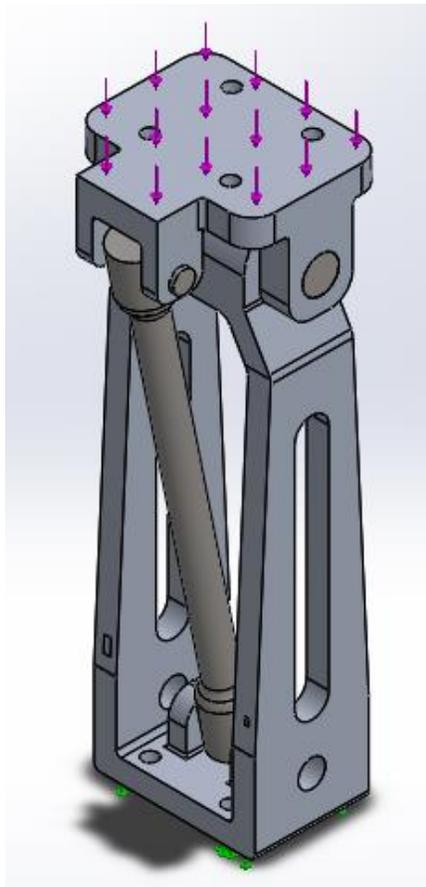


Figura 2.3. Vista isométrica de la aplicación de la fuerza.

El mecanismo tendrá una restricción fija en la base inferior que indica el apoyo plantar durante el ciclo de la marcha, como se muestra en la figura 2.4.

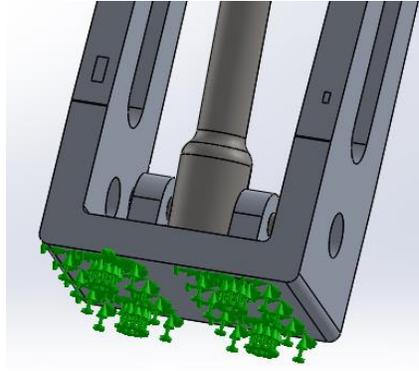


Figura 2.4. Restricción de la base del mecanismo de rodilla.

En la simulación también se modelarán las superficies de contacto entre las distintas partes como se muestra en la figura 2.5, además se observa los nombres de los elementos que constituye el mecanismo con los que se identificarán en el desarrollo del proyecto.

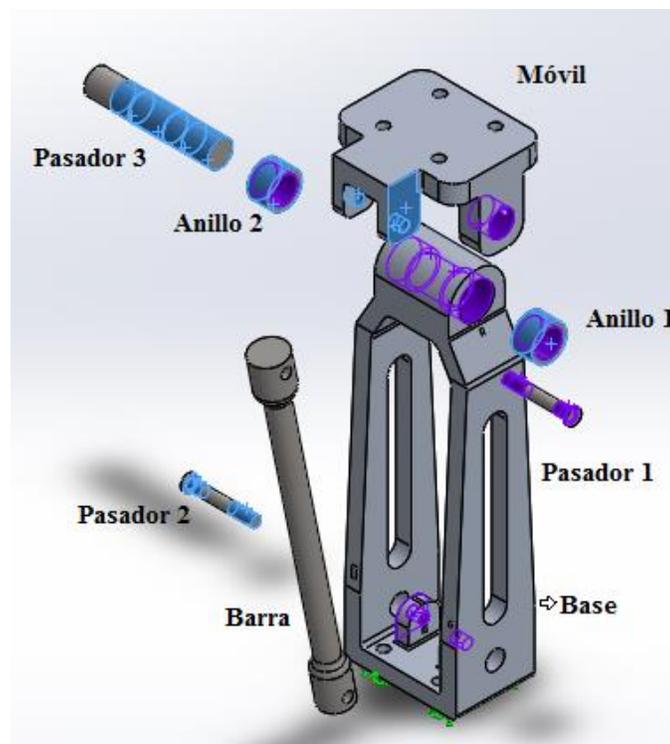


Figura 2.5. Vista explosionada del mecanismo de rodilla con los contactos entre componentes.

Al realizar la simulación del prototipo de rodilla se determinan los esfuerzos combinados de von Mises, esta teoría es la más exacta para materiales dúctiles. En la tabla 2.4 se muestran las

fuerzas correspondientes a cada ensayo; se debe observar que el modelo no falle, el modelo falla cuando el esfuerzo supera el límite elástico del material.

Tabla 2.4. Fuerzas para el ensayo de compresión.

Fuerzas para el ensayo de compresión					
				Categoría P5	
Ensayo	Especificaciones		Fuerza	Condición I	Unidades
1	Peso de la persona	65 kg	637		N
2	Norma ISO 10328	Mínima fuerza de ensayo	Fsp	2240	N
3		Límite de carga para prueba estática	Fsu, nivel inferior	3360	N
4			Fsu, nivel superior	4480	N

Fsp: fuerza mínima de ensayo estático.
Fsu: límite de carga de ensayo estático.

Las galgas extensométricas se colocarán en los puntos donde se produce mayor concentración de esfuerzos, como se indica en la figura 2.6.

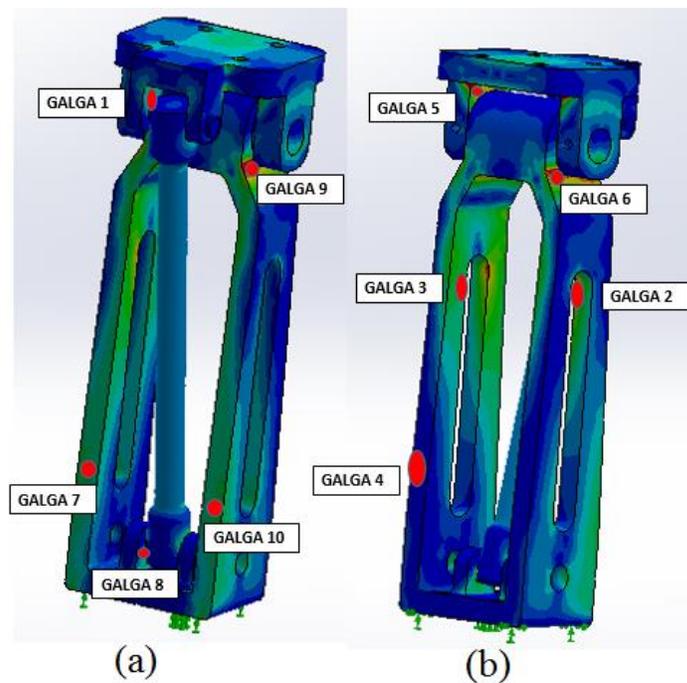


Figura 2.6. Ubicación de las galgas extensométricas, (a) vista posterior inclinada del mecanismo, (b) vista frontal inclinada del mecanismo.

2.4. Criterio de selección de las galgas extensométricas

Se seleccionará las galgas extensométricas de acuerdo al material del mecanismo de articulación de rodilla, las dimensiones de las galgas dependerán del espacio disponible y el área de deformación en las ubicaciones antes mencionadas, se tomará en cuenta el tipo del material de construcción de la grilla y el portador de la galga extensométrica, además los terminales para el soldado y la resistencia de la misma.

2.5. Circuito de medición

Para detectar los cambios en la resistencia que se producen en las galgas extensométricas se utilizará un circuito puente de Wheatstone que permitirá definir, según la variación de resistencia, el estado de deformación de la galga extensométrica.

2.6. Acondicionamiento de la señal

EL acondicionamiento de la señal es de vital importancia; para poder trabajar con rangos de voltajes muy pequeños enviados por el circuito de medición se utilizará un amplificador de instrumentación, el mismo que proporcionará una ganancia para obtener rangos mayores de voltaje.

2.7. Adquisición y visualización de los datos

Para la adquisición de los datos se utilizará un dispositivo myRio® de Nationals Instruments y se usará los puertos MXP ya que tienen una mayor resolución y esto permite tener una mayor precisión en la toma de datos, dado que la señal que envía el puente de Wheatstone envía valores de voltaje en milivoltios, y para la visualización de los datos se realizará una interfaz en la plataforma Labview®.

2.8. Optimización del modelo

Se planteará tres modelos de optimización para la base y un modelo para el móvil del mecanismo, y se seleccionará el modelo con las mejores características con respecto al peso y al factor de seguridad.

Capítulo 3

3. Resultados

3.1. Análisis de elementos finitos

A través del análisis de elementos finitos se determina la distribución de esfuerzos, factor de seguridad y deformaciones unitarias para los ensayos 1, 2, 3 y 4, cuyas características se especifican en la tabla 2.4.

Para determinar la ubicación y selección de las galgas extensométricas se utiliza la información del análisis correspondiente al ensayo 4, donde se aplica una fuerza mayor con respecto a los ensayos 1, 2, 3, en donde se producen concentraciones de esfuerzos y deformaciones mayores al ser una relación directamente proporcional, así mismo, y el factor de seguridad disminuye proporcionalmente.

En la figuras 3.1 a 3.3 se muestra la distribución de esfuerzos, deformaciones unitarias y el factor de seguridad respectivamente que se producen en la parte móvil del mecanismo al aplicar una fuerza de compresión de 4480 N.

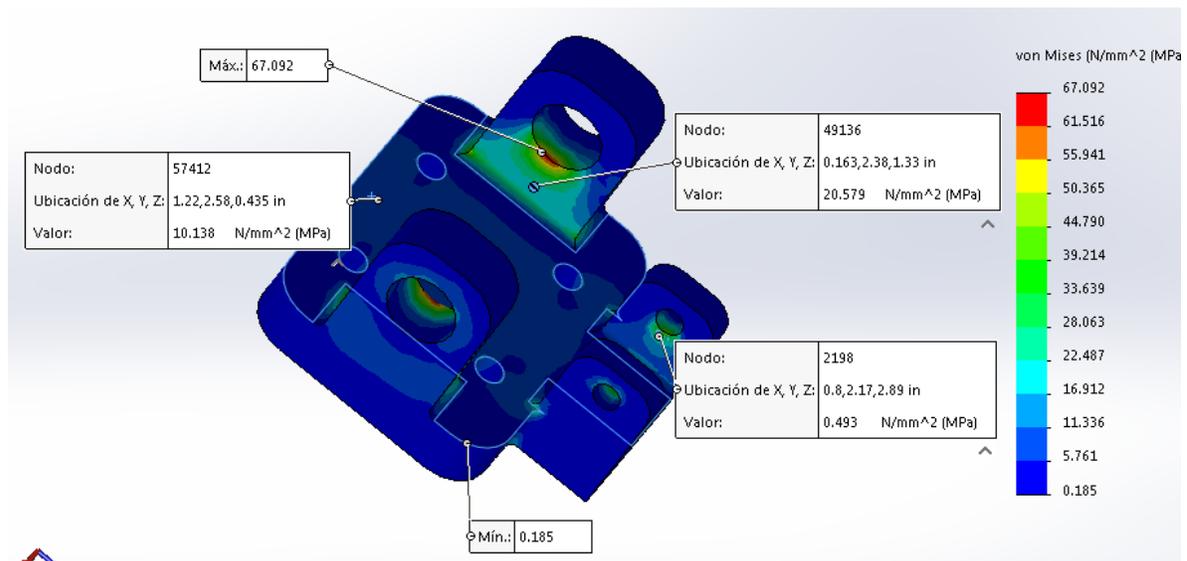


Figura 3.1. Distribución de los esfuerzos en la parte móvil.

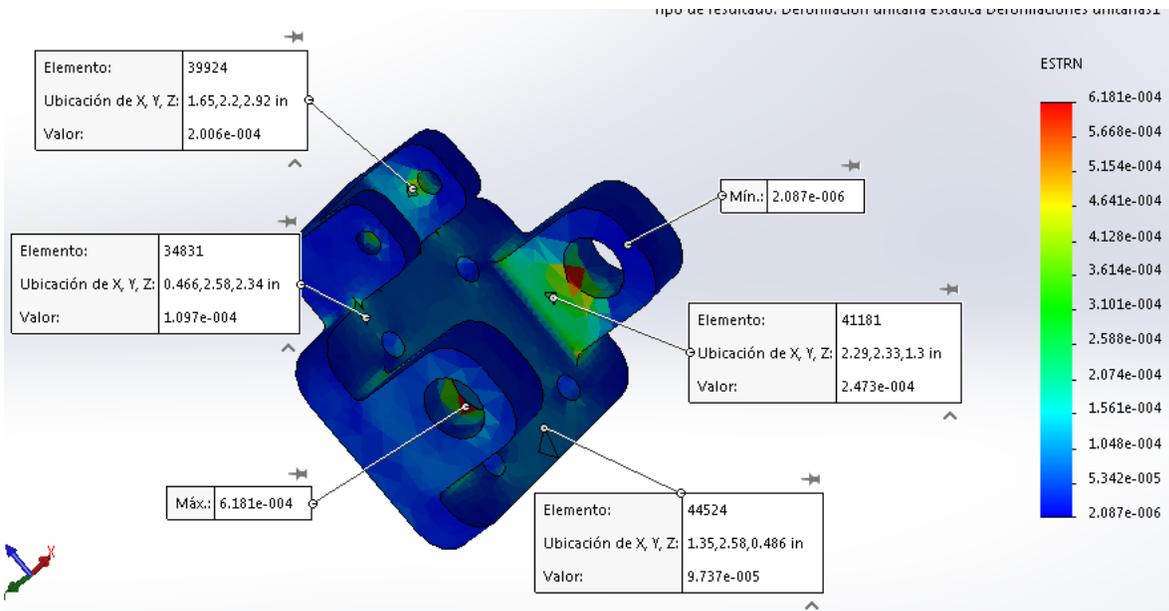


Figura 3.2. Deformaciones unitarias de la parte móvil.

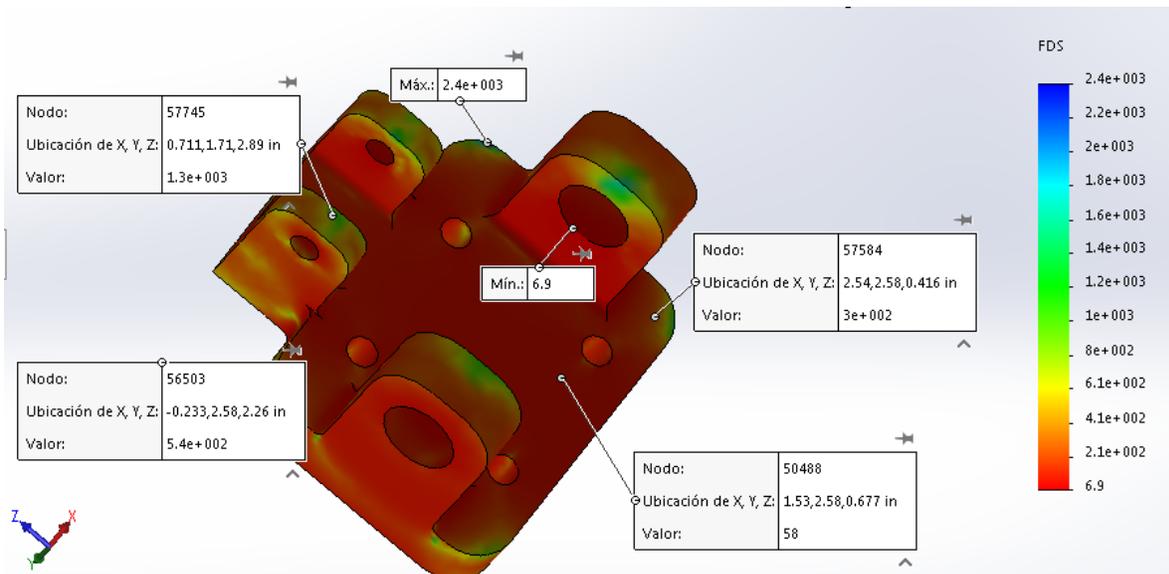


Figura 3.3. Factor de seguridad de la parte móvil.

En las figuras 3.4 a 3.6 se muestra la distribución de esfuerzos combinados, deformaciones unitarias y el factor de seguridad respectivamente que se producen en la base, al aplicar una fuerza de compresión de 4480 N en el análisis de elementos finitos para el ensamble del mecanismo; las figuras mencionadas nos permiten obtener una idea rápida de los rangos de

valores en los que se encuentran las magnitudes mencionadas, adicionalmente se señala algunos valores en zonas de interés para un análisis posterior.

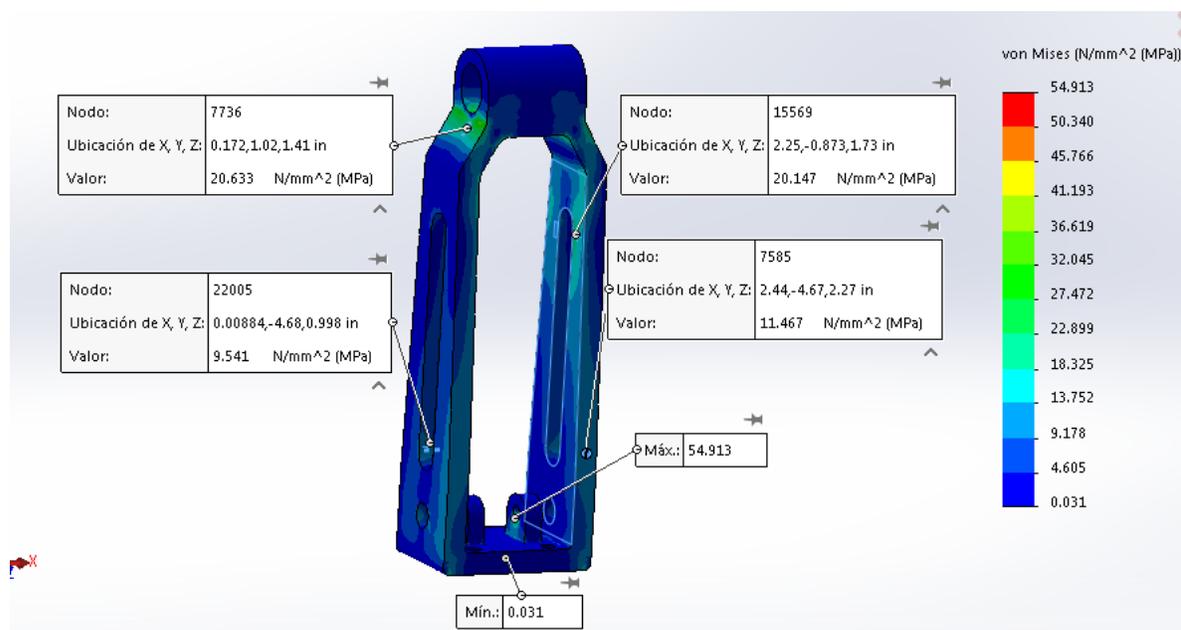


Figura 3.4. Distribución de los esfuerzos en la base del mecanismo.

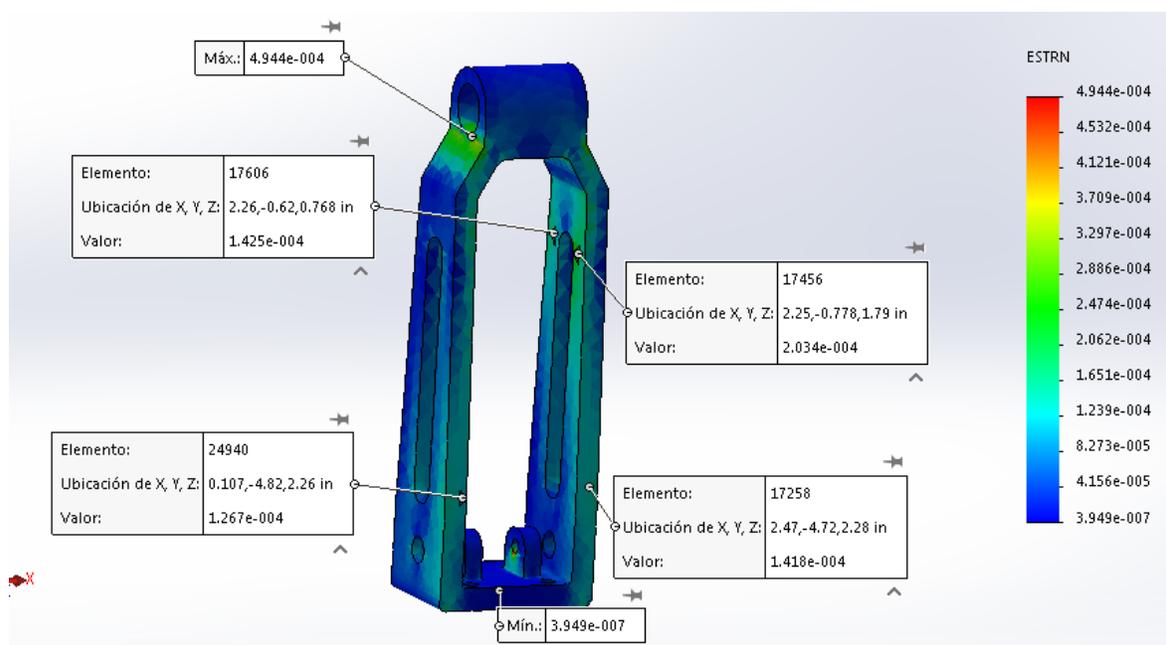


Figura 3.5. Deformaciones unitarias de la base del mecanismo

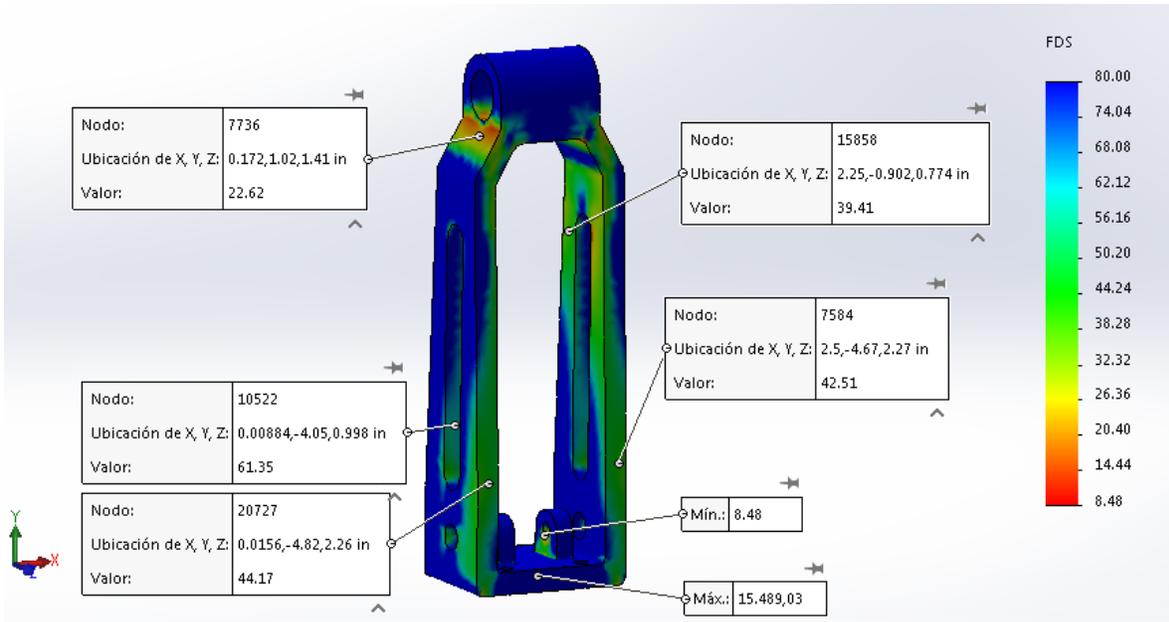


Figura 3.6. Factor de seguridad de la base del mecanismo.

En las figura 3.1 y 3.4 se observa que los esfuerzos máximos en el móvil y la base, respectivamente, son de 67.092 MPa y 54.913 MPa, lo que indica que no superan el límite de elasticidad de la aleación de aluminio 7075 T6, que es 505 MPa, encontrándose en la región elástica.

Barra sustitutiva del actuador.

La barra sustitutiva realiza la función del actuador, cuando el mecanismo de rodilla se encuentra a cero grados, por lo que debe tener las mismas características mecánicas que el actuador, entonces se calcula la rigidez de la barra y se obtiene las magnitudes como se muestra en la figura 3.7 expresadas en milímetros.

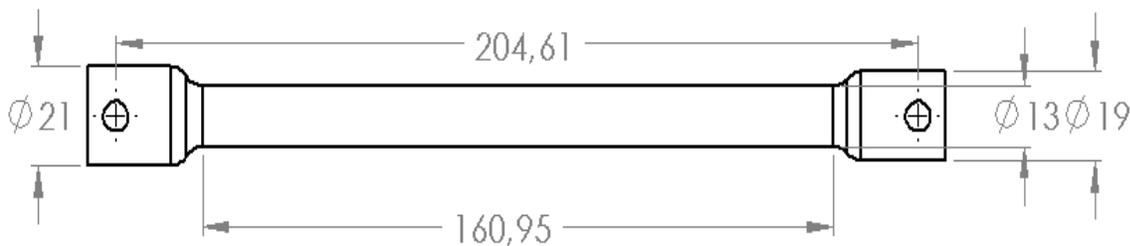


Figura 3.7. Barra sustitutiva del actuador.

3.2. Selección de las galgas extensométricas

Para la selección de las galgas extensométricas se debe considerar algunos parámetros para su correcto funcionamiento. Las galgas seleccionadas de acuerdo a los criterios de la metodología de la sección 2.4 son las SGD-L/R-LY13 de la marca Omega, donde:

- SGD corresponde a la serie de la galga.
- L, indica la longitud de la banda o grilla en milímetros.
- R, indica el valor de la resistencia en ohmios.
- LY corresponde al modelo de la banda.
- 13 es el coeficiente de expansión térmica.

3.2.1. Longitud de banda.

Las galgas extensométricas presentan diferentes medidas de banda o grilla, este es un factor importante al momento de seleccionar la galga, ya que el tamaño de la grilla debe estar dentro de la zona donde se produce la máxima deformación, en caso contrario se obtiene deformaciones muy bajas o datos erróneos.

En la figura 3.8 se puede observar que la zona media de la galga es más sensible y es allí donde se produce la mayor deformación, la galga mide el valor medio correspondiente

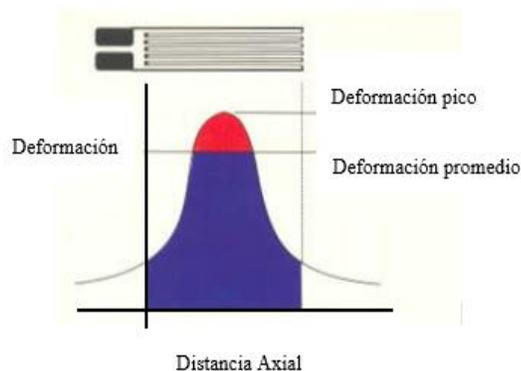


Figura 3.8. Deformación de la galga con respecto a la zona de la grilla. (OMEGA, 2015)

También se considera la longitud de la galga dependiendo del espacio y la facilidad para su montaje, para su colocación se debe considerar las medidas totales de la galga incluyendo el

material que las protege. En la figura 3.9 se muestra un ejemplo de cómo tomar las medidas de las galgas las mismas que se encuentran en los catálogos o manuales de usuario.

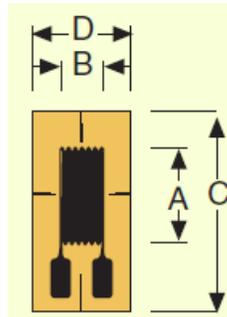


Figura 3.9. Dimensiones de una galga extensométrica. (OMEGA, 2015)

Una vez considerados estos parámetros se eligen las galgas de 3 y 7 milímetros de grilla, según los datos que se obtuvieron en la simulación y el espacio para su instalación.

En la tabla 3.1 se indica las características principales de las galgas seleccionadas del catálogo de (Omega, 2013) también se puede ver el voltaje máximo (V_{rms}) de alimentación para cada galga seleccionada.

Tabla 3.1. Dimensiones de las galgas seleccionadas

Modelo	Dimensiones(mm)				Voltaje (V) (V_{rms})
	GRILLA		PORTADOR		
	A	B	C	D	
SGD-3/350-LY13	3,2	2,5	7	4	13
SGD-7/350-LY13	6,5	3,1	11,4	5,1	20

3.2.2. Modelo de la banda.

El modelo de la banda es LY para mediciones uniaxiales, debido al ensayo que será sometido el mecanismo, las galgas uniaxiales miden deformaciones que se producen en una sola dirección por tensión o compresión.

3.2.3. Serie de la galga extensométrica.

Los fabricantes utilizan letras para identificar algunas características como el tipo de aleación del material de construcción, los terminales de conexión, el material de soporte entre otros, estos datos se encuentra en los catálogos o manuales de usuario.

La serie seleccionada es SGD, esto indica que la galga está compuesta por Constantán y una película de poliamida, lo que le hace resistente y flexible, además es el material más usado y barato, apto para el análisis de mediciones estáticas y dinámicas.

3.2.4. Resistencia de la galga extensométrica.

El valor de la resistencia seleccionado es 350 Ω , permite obtener variaciones más grandes de resistencia y consecuentemente un rango de voltaje más amplio, lo que facilita el acondicionamiento de la señal y adquisición de los datos. Además reduce la compensación de temperatura y tiene menor porcentaje de ruido en la señal.

3.2.5. Número STC.

El número STC corresponde al coeficiente de expansión térmica, en algunos casos es un factor crítico y debe ser seleccionado adecuadamente para que no haya descompensación en algunas deformaciones.

El número STC seleccionado es 13, correspondiente a aluminio y aleaciones de aluminio.

3.3. Instalación de las galgas extensométricas

3.3.1. Preparación del material.

Se marca la región aproximada donde se ubicará la galga se lija la superficie. Por lo general se recomienda utilizar lija N° 400, la superficie debe quedar totalmente lisa no debe existir rayas o rugosidades.

3.3.2. Pegado de las galgas extensométricas.

Para pegar las galgas extensométricas se limpia la superficie con una franela absorbente junto con limpiador de contactos, o se puede utilizar acetona o alcohol.

Se marca el lugar donde se colocará la galga, se toma la galga con pinzas y sosteniéndole de los cables. Para el pegado se puede ayudar con cinta adhesiva para colocar en la superficie correcta.

Se levanta un costado de la cinta adhesiva y se coloca una gota de pega para galgas. Se vuelve a pegar el extremo levantado de la cinta y se presiona en movimientos circulares, hasta que se adhiera en el lugar correcto. Finalmente se retira la cinta adhesiva de la galga.

3.3.3. Soldado de los terminales de las galgas extensométricas.

Para soldar los terminales de las galgas se coloca un aislante en el mecanismo para que no exista contacto entre el material del mecanismo y los terminales de la galga. Se suelda los terminales de la galga a un grupo de cables que permitirá la conexión al circuito de medición.

3.3.4. Protección de las galgas extensométricas.

Una vez soldado los terminales de las galgas se protege con resina epóxica para evitar que se interrumpa la conexión eléctrica por ruptura de la soldadura. Hay que considerar que los terminales de la galga son muy delgados y al romperse ya no se pueden volver a soldar.

3.4. Sistema de medición de deformaciones

Los puntos seleccionados para ubicar las galgas extensométricas son 10 como se indica en la metodología de la sección 2.3, donde las galgas extensométricas 1 a 8 serán implementadas con un circuito de medición y un dispositivo myRIO, para determinar los valores de voltaje cuando se producen las deformaciones a través de una interfaz de usuario realizada en la plataforma Labview®, y las galgas 9 y 10 serán conectadas a un dispositivo de monitoreo portátil de tensiones DM-22 de la empresa Omega que permite medir deformaciones.

3.4.1. Diseño del circuito del puente de Wheatstone.

El circuito de medición implementado es el puente de Wheatstone con una galga, es una configuración de cuatro resistencias para sensores resistivos, el cual mide variaciones de resistencia muy pequeñas y las convierte en voltaje, lo que permite obtener una salida de voltaje para procesar las señales.

En la figura 3.10 se muestra la configuración del puente de Wheatstone realizado en el software Multisim® de National Instruments con la galga extensométrica que reemplaza una resistencia del puente, además se puede observar que las tres resistencias y la galga extensométrica son del mismo valor.

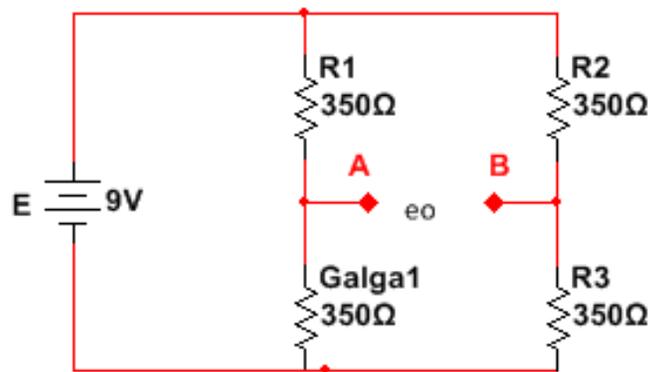


Figura 3.10. Puente de Wheatstone con una galga.

3.4.2. Deformación máxima de la galga extensométrica.

Para determinar la tensión de salida de voltaje e_0 , cuando las deformaciones son producidas por compresión se realiza los siguientes cálculos previos.

Utilizando la ecuación 1.2 se determina la variación de resistencia con los siguientes datos.

- $K_s = 2,1$, es el factor de galga según el catálogo de OMEGA.
- $R = 350 \Omega$, es el valor de resistencia de la galga.
- $\varepsilon = 0,01$, el porcentaje de deformación a compresión es el 1%, si supera este rango, la galga sobrepasa el límite de elasticidad, y ya no mide resistencia.

Utilizando la ecuación 1.3 y reemplazando los datos antes mencionados obtenemos la variación máxima de la resistencia, $\Delta R = 7,35 \Omega$, es decir, indica la deformación máxima que soporta la galga extensométrica.

Utilizando la ecuación 1.7 y reemplazando el valor del voltaje de entrada $E = 9 V$ y la variación de resistencia con respecto a la deformación máxima se obtiene el valor del voltaje de salida del puente de Wheatstone, $e_0 = -47,25 mV$

Los rangos de voltaje para que la galga extensométrica no alcance el límite de rotura son de $0 V$ hasta valores menores o iguales a $-47,25 mV$, el signo negativo indica que está a compresión, más no se debe usar el valor negativo para el acondicionamiento de la señal.

3.4.3. Deformaciones máximas del mecanismo.

Las deformaciones que se producen en el mecanismo al realizar el ensayo de compresión deben estar incluidas en los valores de la galga extensométrica, ya que si las deformaciones que se producen en el material son mayores, la galga llegará al límite de rotura. Por tal razón, antes de realizar el ensayo se realiza la simulación y se comprueba que estos valores no superen el límite de elasticidad de los materiales utilizados en la prótesis de rodilla.

Para obtener los rangos de voltaje para que el mecanismo no alcance el límite de rotura se realiza el mismo procedimiento de la sección 3.4.2 y se obtiene que los valores deben ser de $0 V$ hasta valores menores o iguales a $-4,725 mV$, para una deformación de $0,001$.

3.5. Procesamiento de la señal

El puente de Wheatstone se encuentra inicialmente en equilibrio con un voltaje igual a cero, cuando la galga es sometida a compresión varía su resistencia, por lo que a la salida del puente se obtiene valores de voltaje en milivoltios que son rangos demasiado pequeños. Para poder utilizar estos valores se debe acondicionar la señal con un amplificador de instrumentación.

Amplificador de instrumentación.

El amplificador de instrumentación utilizado es el AD620. En la figura 3.11 se puede ver la conexión del puente de Wheatstone junto con la etapa acondicionadora.

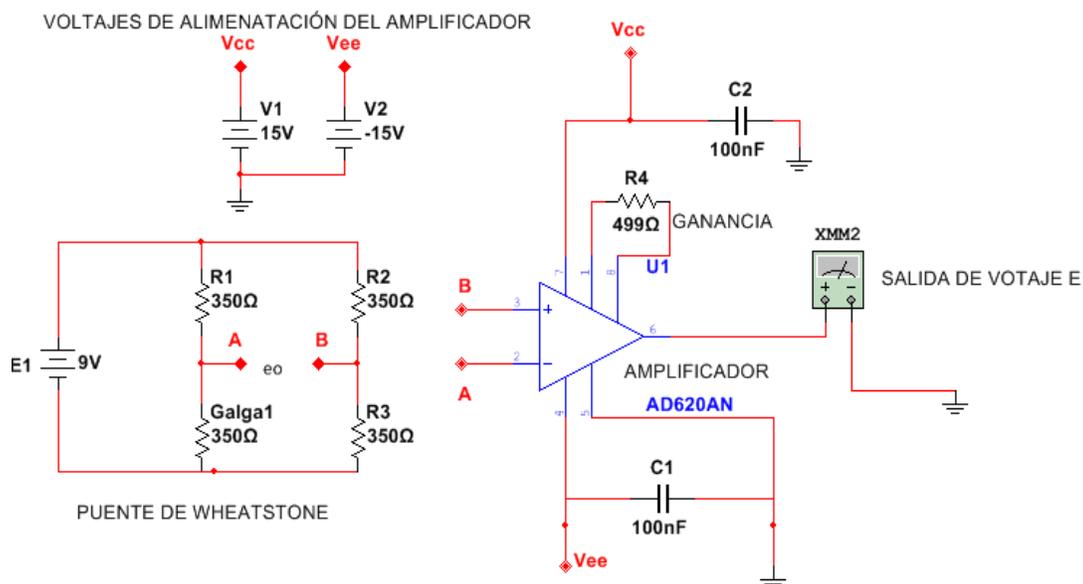


Figura 3.11. Circuito amplificador de la señal.

Para ajustar el valor de la resistencia R_4 del circuito de la figura 3.11 se debe asignar un valor de ganancia de acuerdo a las hojas técnicas del amplificador de instrumentación. El valor asignado para la ganancia es igual a 100 ya que con este valor el amplificador debe entregar una salida de voltaje alrededor de los 5 voltios. Con una ganancia de 100, el valor de la resistencia es igual a 499 Ω .

En la figura 3.12 se muestra la vista superior del circuito final en PCB con los ocho puentes de Wheatstone para la adquisición de la señal de las galgas extensométricas.

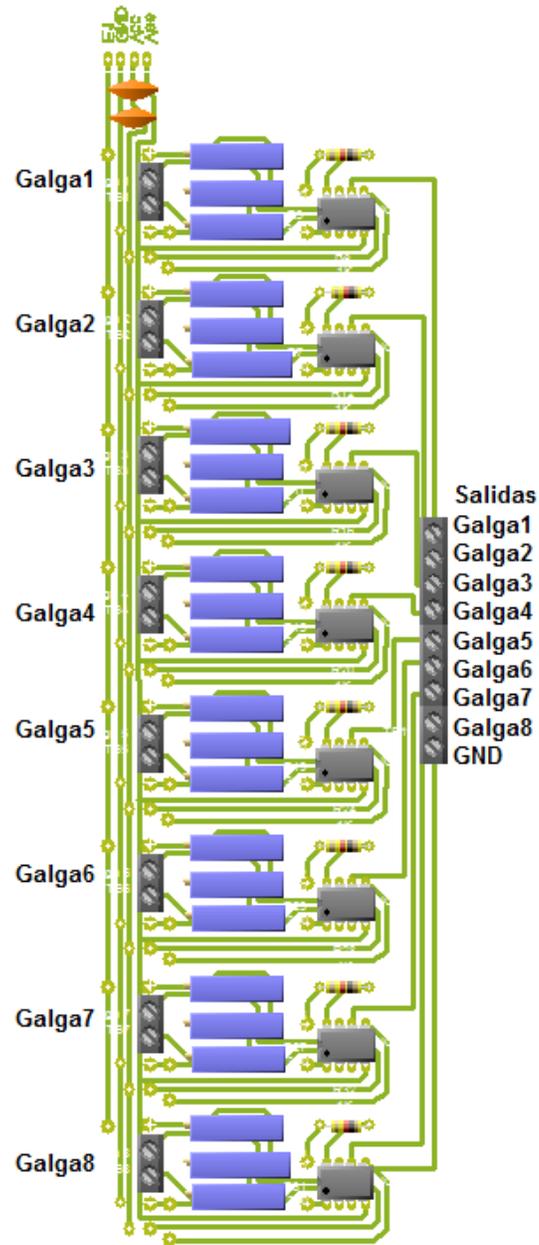


Figura 3.12. Vista superior del circuito PCB para la adquisición de las señales de las galgas extensométricas.

3.6. Sistema de adquisición de datos

Para la adquisición de los datos se utiliza una tarjeta myRIO® de National Instruments, porque tiene varios puertos de entrada análogos, estos corresponden a cada salida de voltaje del puente de Wheatstone.

Se utiliza los 4 puertos MXP A y los 4 puertos MXP B del dispositivo myRIO® para entradas análogas ya que los valores de voltajes enviados por las galgas extensométricas son positivos y menores a 5 voltios, la resolución de estos puertos es 12 bits; y tienen mayor resolución lo que permite tener mayor precisión en la adquisición de datos.

3.7. Visualización de datos

Con la finalidad de visualizar y guardar los datos de las galgas extensométricas para el análisis, se realiza un programa utilizando la plataforma de desarrollo de sistemas Labview®

En el programa se carga el modelo del mecanismo y se coloca sensores en los puntos donde se ubican las galgas, como se muestra en la figura 3.13, para que permita observar a través de una escala de colores como se producen las deformaciones durante el ensayo de compresión

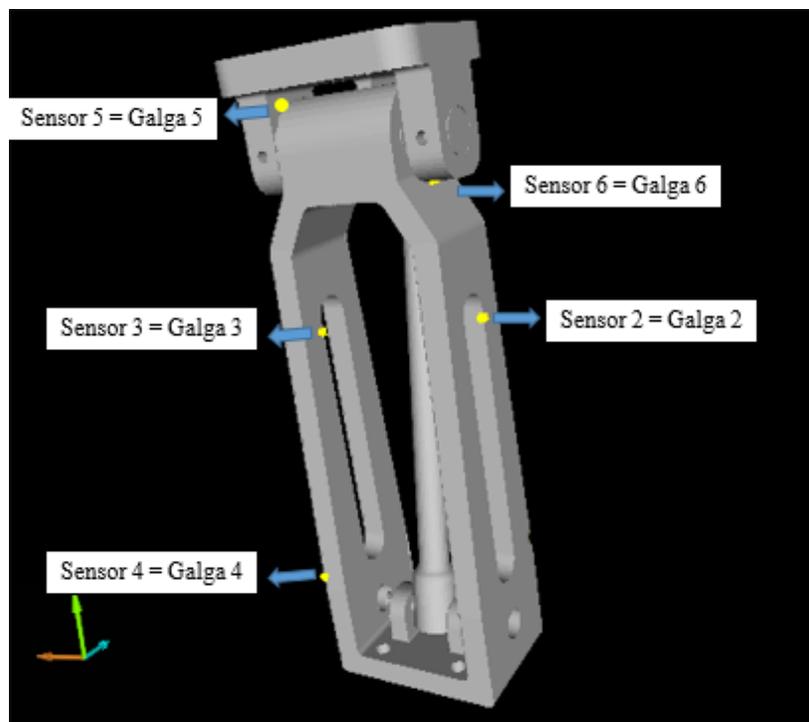


Figura 3.13. Ubicación de sensores en el mecanismo.

Los sensores en el mecanismo de rodilla se muestran en la figura 3.13 de color amarillo, donde se puede visualizar solamente los sensores de la vista frontal inclinada a la izquierda.

3.8. Ensayo de compresión

Para realizar el ensayo de compresión se cumple con el procedimiento que se muestra en la figura 3.14, se energiza los amplificadores de instrumentación con $\pm 15v$ y las galgas extensométricas con $9v$.

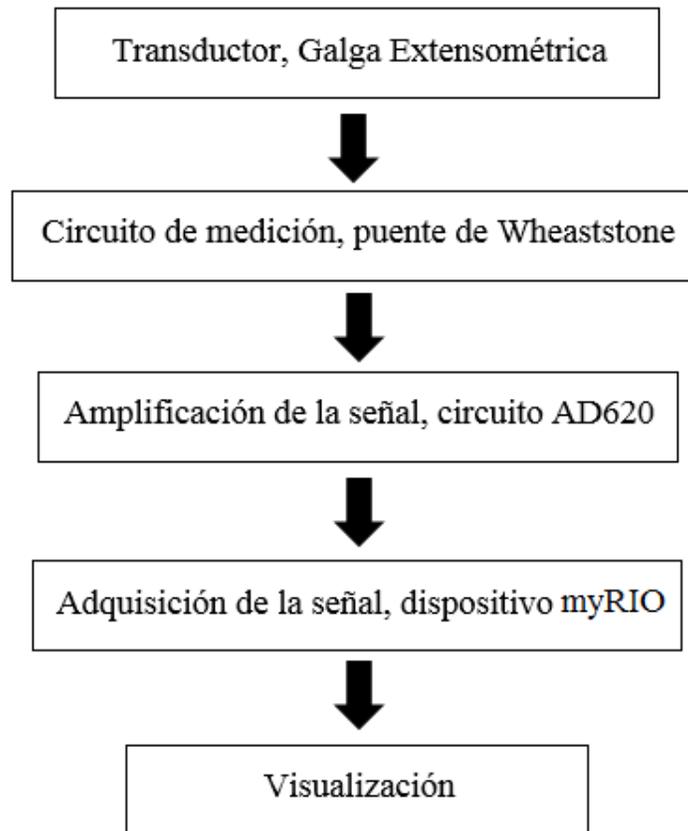


Figura 3.14. Diagrama de bloques del proceso de adquisición de la señal

3.9. Programas en Labview® para la adquisición de las señales

Se ejecuta los programas realizados en la plataforma Labview® y conjuntamente con el dispositivo myRIO® se adquiere los datos enviados por las galgas extensométricas.

En la figura 3.15 y 3.16 se muestra el diagrama de bloques realizado en Labview®, donde se encuentran las entradas análogas para cada galga extensométrica las cuales transfieren datos al panel frontal y permite observar en la interfaz de usuario las curvas de voltaje enviadas por las galgas de acuerdo al rango de deformación. En el panel frontal o interfaz de usuario de la figura

3.17 se muestra un botón que indica el rango máximo de voltaje que no deben exceder las galgas para evitar que sobrepasen el límite de ruptura.

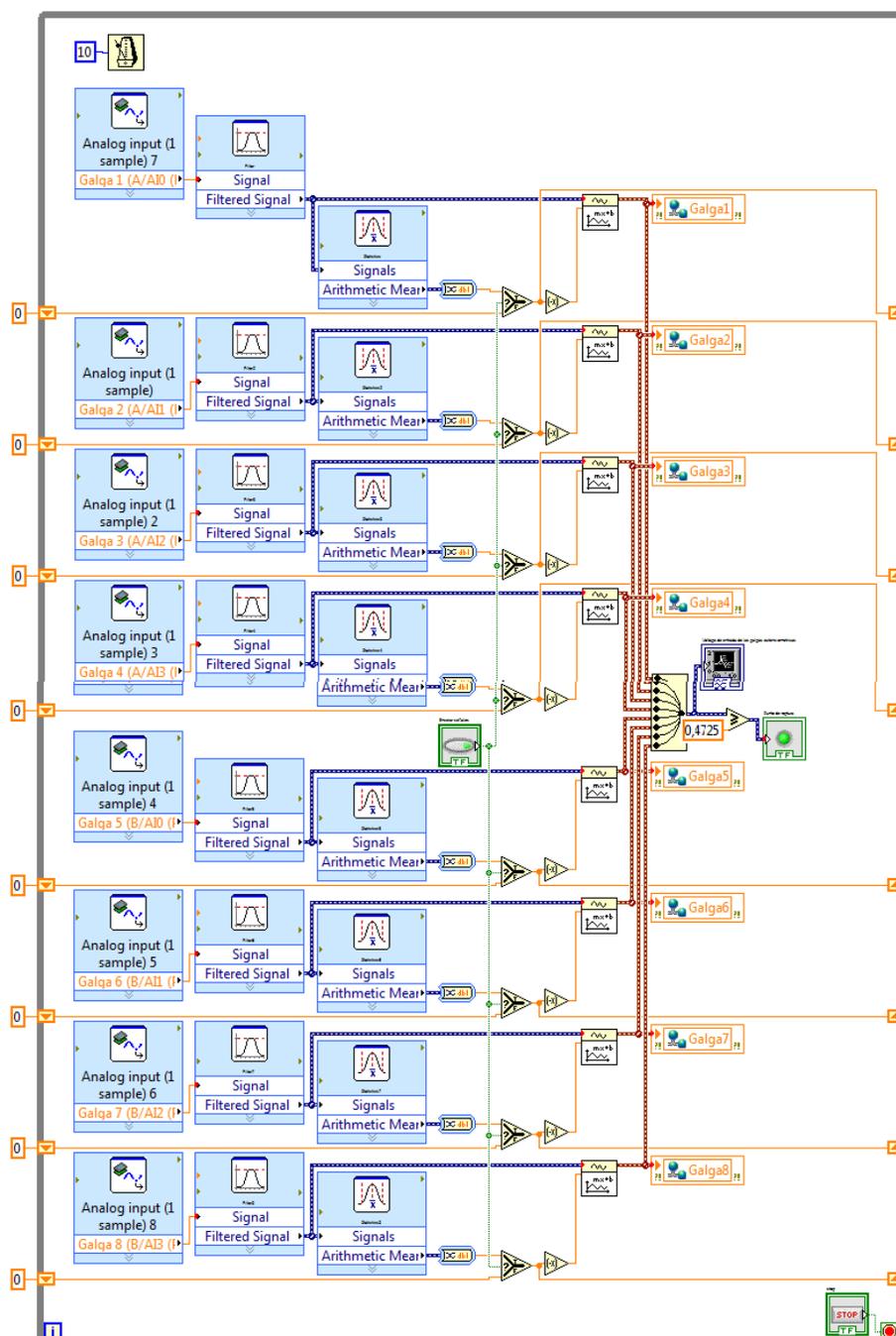


Figura 3.15. Diagrama de bloques para el rango máximo de voltaje.

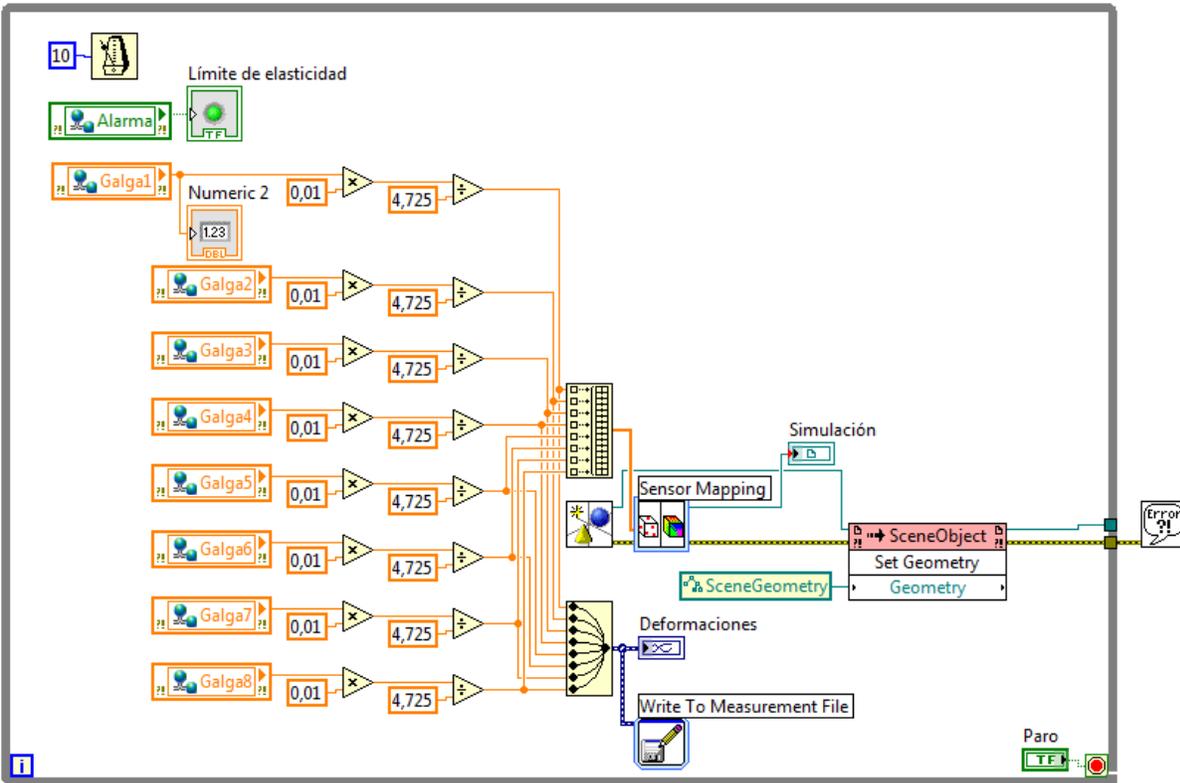


Figura 3.16. Diagrama de bloques del programa para adquisición de datos.



Figura 3.17. Interfaz de usuario para las curvas de voltaje máximo.

En la figura 3.18 se muestra la interfaz de usuario que permite visualizar en la ventana izquierda el modelo de la rodilla y su comportamiento cuando se aplica una fuerza en el ensayo de compresión, y en la ventana derecha las curvas de deformación obtenidas de los datos enviados de las galgas extensométricas



Figura 3.18. Interfaz de usuario para visualización de las curvas de deformación.

3.10. Ubicación del mecanismo de rodilla

Para realizar los ensayos de compresión se utiliza una máquina de ensayos universales MTS TK/T5002 disponible en la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) ubicada en Sangolquí. Está formada mecánicamente por una parte estructural, un cabezal fijo, un cabezal móvil, dos tornillos sin fin, una barra guía con fines de carrera, poleas, bandas, acoples y dos motores. En la figura 3.19 se observa un esquema de las partes constituyentes de la misma. La máquina de ensayos tiene una interfaz de usuario donde se ingresa el valor de las fuerzas a aplicar, se puede observar desplazamientos y la frecuencia.

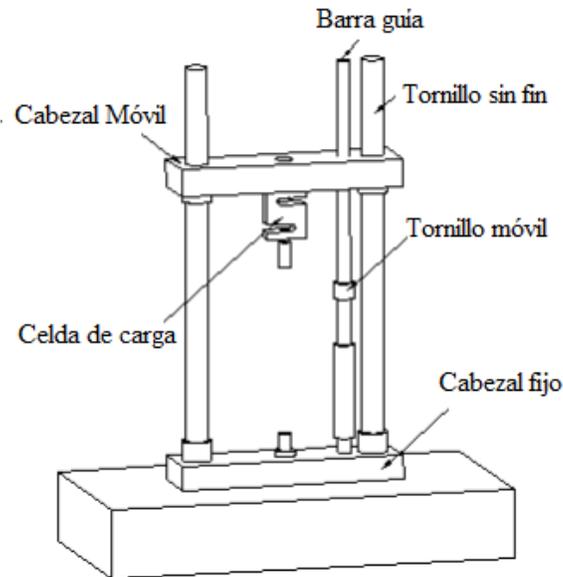


Figura 3.19. Esquema de los componentes de la máquina de ensayos universales.

Se coloca el mecanismo de rodilla en el centro del cabezal fijo de la máquina de ensayos, se mueve el cabezal móvil hasta que la celda de carga llegue al centro de la parte superior del móvil del mecanismo de prótesis. Una vez colocado el mecanismo de prótesis se aplica la fuerza ingresando el valor desde la interfaz de usuario.

Se realizan cuatro ensayos de compresión, el primero a 637 N, fuerza correspondiente al peso de la persona. En el segundo, tercero y cuarto se aplica las cargas máximas de la prueba estructural de la norma ISO 10328. En la figura 3.20 se observa el mecanismo de rodilla en su posición final antes de someterle al ensayo de compresión.

Previamente el circuito debe estar provisto de energía eléctrica constante y el dispositivo myRio® en este caso debe estar conectado inalámbricamente a la computadora a través de wifi porque permite trabajar con menor cableado y permite ubicar la computadora a gran distancia del lugar del ensayo.

Se realiza el mismo procedimiento para los 4 ensayos.



Figura 3.20. Ubicación del mecanismo en la máquina de ensayos.

3.11. Visualización de los datos del ensayo

La visualización de los datos durante los cuatro ensayos se indica en las figuras 3.21 a 3.23, donde se puede observar los valores de deformaciones en función del tiempo, mientras en el gráfico del mecanismo se observa una variación de colores en los lugares donde se ubican las galgas extensométricas.

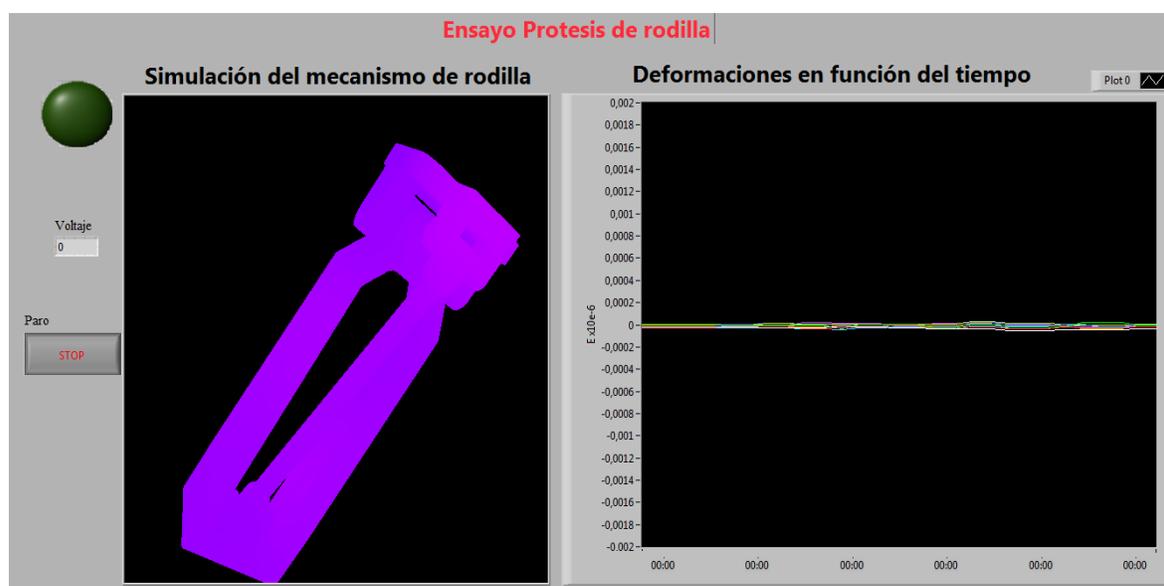


Figura 3.21. Posición inicial del mecanismo, $F=0\text{ N}$

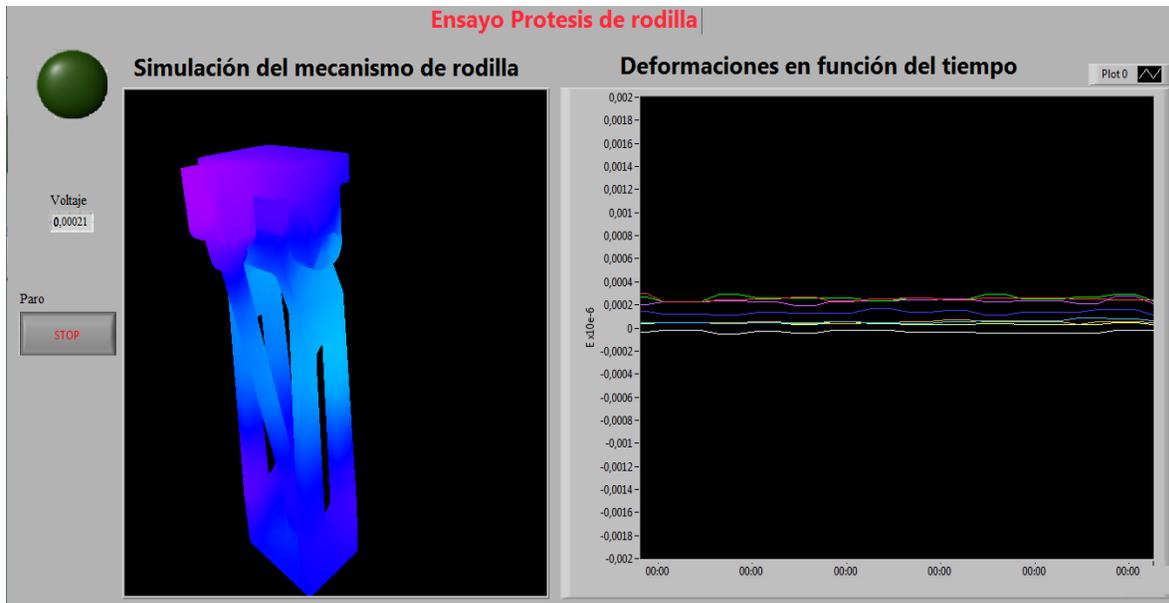


Figura 3.22. Aplicación de la fuerza diferente de 0 N

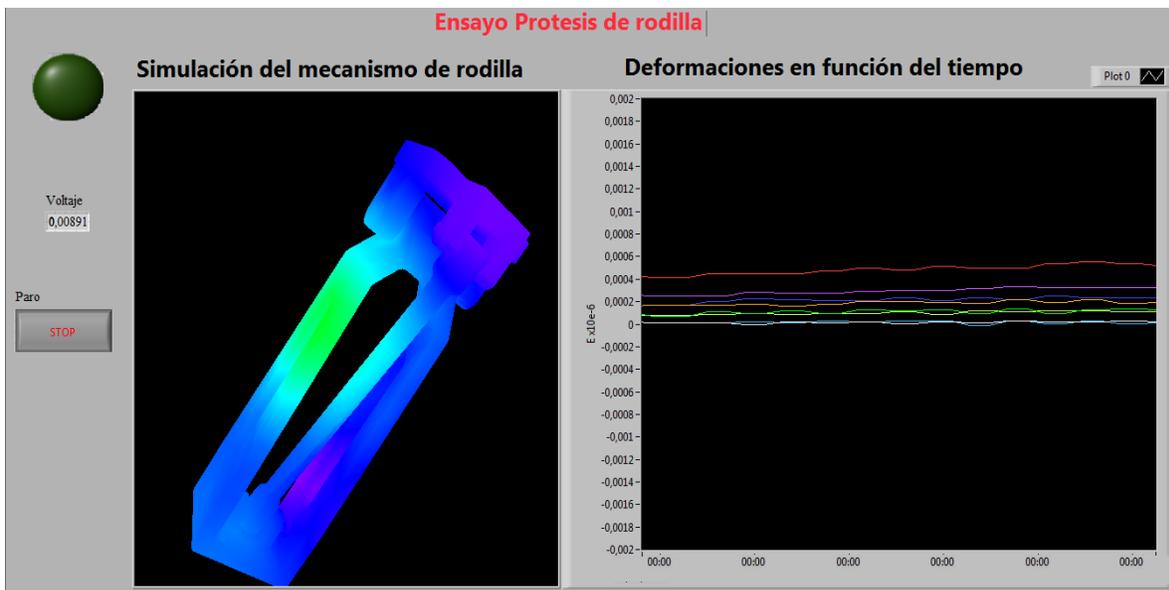


Figura 3.23. Visualización del comportamiento del mecanismo y las curvas de las señales.

En la figuras 3.22 y 3.23 se puede ver que el mecanismo cambia de color, conforme cambia la resistencia de las galgas extensométricas al aplicar una fuerza diferente de cero.

3.12. Análisis de convergencia de los modelos de elementos finitos.

Se realiza un análisis de convergencia con los datos de esfuerzos combinados y número de elementos obtenidos en varias iteraciones del análisis de elementos finitos para el ensayo 4, que representa el ensayo que se aplicó la fuerza mayor, concluyendo que la malla para un análisis óptimo contiene 60.282 elementos y posee un error porcentual inferior a 5 % respecto a una malla anterior con 59.800 elementos como se muestra en la tabla 3.2. El mismo procedimiento se realiza para los tres ensayos restantes.

Tabla 3.2. Datos de esfuerzo de una fuerza de 4483 N.

Fuerza 4483N			
Malla	Nro Elementos	Esfuerzo(MPa)	Error Porcentual
m17	47.168	72,036	
m18	48.129	71,914	0,17
m21	49.681	73,435	2,12
m23	50.113	72,154	1,74
m24	52.434	72,597	0,61
m25	54.697	71,105	2,06
m26	57.109	72,01	1,27
m27	58.427	73,916	2,65
m28	59.800	71,741	2,94
m29	60.282	74,055	3,23

En la tabla 3.3 se muestra las fuerzas que se aplicó durante el ensayo y las fuerzas según la norma ISO. Las fuerzas son diferentes debido a la precisión de la máquina de ensayos de compresión.

Tabla 3.3. Fuerzas del ensayo y simulaciones.

Ensayo	Fuerza según la norma ISO 10328 (N)	Fuerza aplicada en el ensayo (N)
1	637	665
2	2240	2240
3	3360	3743
4	4480	4483

3.13. Análisis de resultados de los ensayos en la prótesis de rodilla

Para comparar los resultados de deformaciones obtenidos en los ensayos con los resultados de deformaciones obtenidos en el análisis de elementos finitos en el programa SolidWorks®, se crea sensores en el modelo del mecanismo de prótesis de rodilla en la misma ubicación y con las dimensiones de las galgas extensométricas, luego se toma los valores de los elementos de la malla que componen el sensor y se obtiene el valor promedio de las deformaciones en esa área.

Ensayo 2

A continuación se indica el procedimiento que se realizó para obtener los datos de deformaciones de la simulación y de los ensayos de compresión. Se toma como ejemplo la galga extensométrica 6 del ensayo 2, como se muestra en la figura 3.24.

Se realiza el mismo procedimiento para las 7 galgas extensométricas restantes para todos los ensayos.

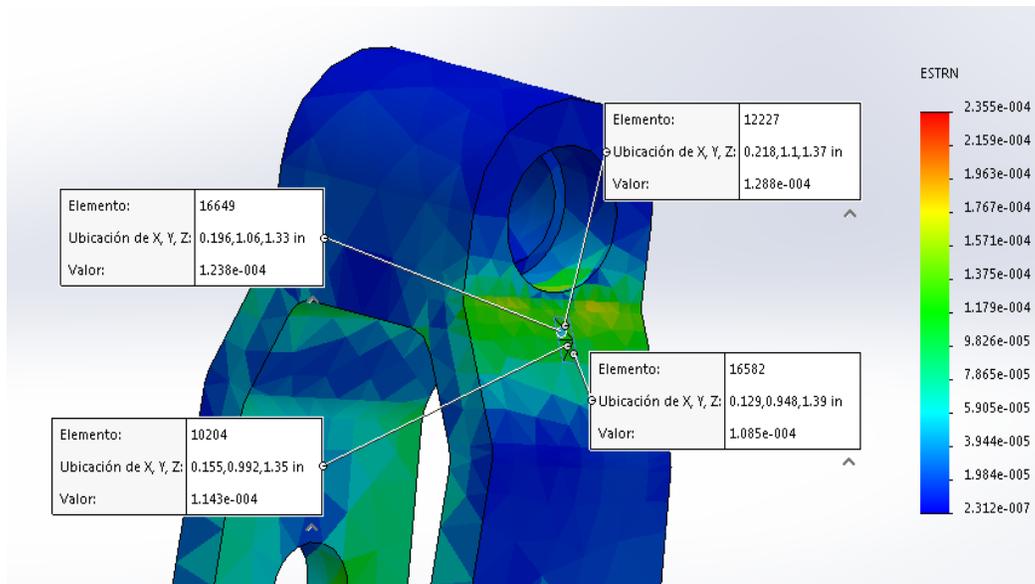


Figura 3.24. Ubicación del sensor de la galga extensométrica 6.

En la figura 3.24 se muestra la ubicación del sensor correspondiente a la galga extensométrica 6. Dentro del área del sensor se obtiene cuatro valores de deformaciones, se realiza el promedio para obtener la deformación máxima y se tiene que la deformación es, $\varepsilon_{pro} = 1,1883 \times 10^{-4}$.

Las galgas extensométricas envían 894 datos durante el ensayo 2 de compresión, el número de datos para cada ensayo dependerá del tiempo que dure la aplicación de la fuerza durante el ensayo a través del dispositivo myRIO® hacia la interfaz de Labview®. Se toma todos los valores, para obtener la curva de deformación en función del tiempo, se discriminan los picos de amplitud por ruido a través del ajuste de una curva polinómica de tercer grado que facilita la obtención del valor promedio máximo.

En la figura 3.25 se puede observar el ajuste de la curva, donde la curva de color celeste representa todos los datos obtenidos durante el ensayo de compresión, y la curva de color rojo el resultado de aplicar líneas de tendencia.

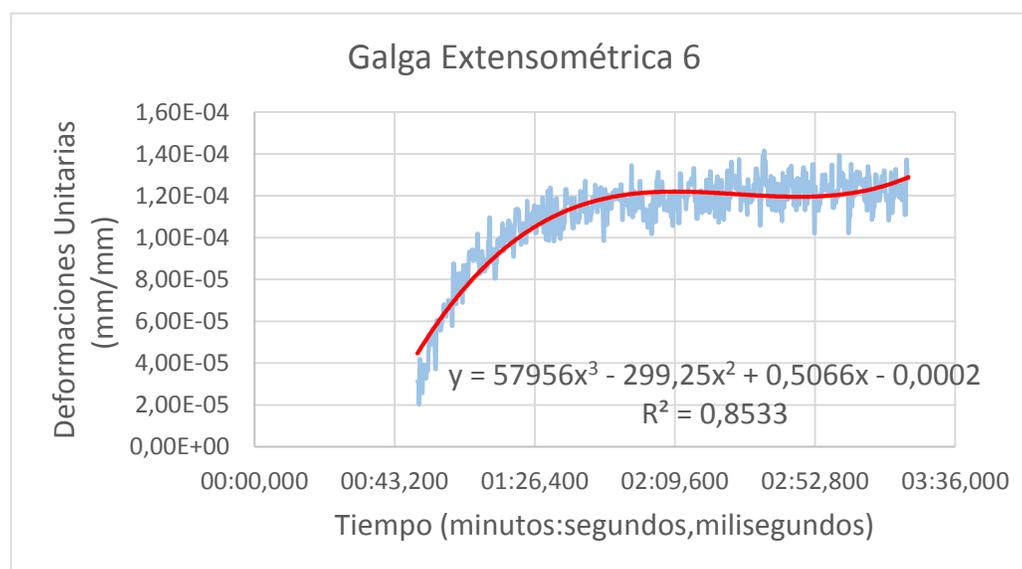


Figura 3.25. Curva de deformaciones en función del tiempo de la galga extensométrica 6.

El valor de la deformación máxima obtenida de la línea de tendencia ajustada a los datos enviados por la galga extensométrica 6 es, $\varepsilon_{G6} = 1,1985 \times 10^{-4}$.

El error porcentual entre las deformaciones del ensayo y las deformaciones del análisis de elementos finitos es 0,85 %.

Adicionalmente se tiene los datos de las galgas extensométricas 9 y 10, estas galgas tienen las mismas especificaciones que las galgas utilizados en el mecanismo, la diferencia es el valor de su resistencia igual a 120 Ω .

Tabla 3.4. Datos de deformaciones de las galgas extensométricas.

Galgas	Datos	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	ensayo 4
Galga 1	Simulación	3,5595E-05	1,1810E-04	2,0060E-04	2,4085E-04
	Ensayo	3,4554E-05	1,2081E-04	2,1273E-04	2,6357E-04
	Error porcentual %	3,01	2,24	5,70	8,62
Galga2	Simulación	3,4130E-05	1,1560E-04	1,9285E-04	2,3100E-04
	Ensayo	3,6733E-05	1,1501E-04	2,0851E-04	2,5755E-04
	Error porcentual %	7,09	0,51	7,51	10,31
Galga 3	Simulación	1,7475E-05	5,9085E-05	9,8295E-05	1,2790E-04
	Ensayo	1,5700E-05	5,2800E-05	1,0874E-04	1,2426E-04
	Error porcentual %	11,31	11,90	9,61	2,93
Galga 4	Simulación	5,4225E-07	1,9125E-06	3,3890E-06	5,8347E-06
	Ensayo	No definido	No definido	No definido	No definido
	Error porcentual %				
Galga 5	Simulación	3,9275E-05	1,2905E-04	2,2785E-04	2,6890E-04
	Ensayo	3,9000E-05	1,2552E-04	2,0998E-04	2,3917E-04
	Error porcentual %	0,71	2,81	8,51	12,43
Galga 6	Simulación	3,4023E-05	1,1883E-04	1,8813E-04	2,3240E-04
	Ensayo	3,5000E-05	1,1985E-04	1,8721E-04	2,3007E-04
	Error porcentual %	2,79	0,85	0,49	1,01
Galga 7	Simulación	1,9225E-05	6,6690E-05	1,1160E-04	1,3265E-04
	Ensayo	1,9800E-05	6,8446E-05	1,2165E-04	1,3954E-04
	Error porcentual %	2,90	2,56	8,26	4,93
Galga 8	Simulación	2,5800E-05	8,5970E-05	1,6440E-04	1,8730E-04
	Ensayo	2,7000E-05	8,4632E-05	1,6273E-04	1,9820E-04
	Error porcentual %	4,44	1,58	1,03	5,50
Galga 9	Simulación	3,4815E-05	1,2575E-04	1,9845E-04	2,3160E-04
	Ensayo	3,6100E-05	1,3200E-04	2,1000E-04	2,4000E-04
	Error porcentual %	3,56	4,73	5,50	3,50
Galga 10	Simulación	1,2153E-05	7,0060E-05	1,1655E-04	1,3995E-04
	Ensayo	1,2500E-05	6,7300E-05	1,1000E-04	1,3200E-04
	Error porcentual %	2,78	4,10	5,95	6,02

La galga 9 y 10 fueron colocadas después de realizar la primera prueba de los cuatro ensayos, se las colocó para poder medir las deformaciones a través de un dispositivo de monitoreo portátil de tensiones DM-22 de la empresa Omega disponible en el lugar donde se realizó los ensayos,

y así obtener una opción adicional para comparar con los resultados obtenidos del análisis de elementos finitos.

En la tabla 3.4 se muestra los resultados de las deformaciones máximas obtenidas por las 10 galgas extensométricas durante los ensayos 1, 2, 3 y 4, y los resultados promedios de las deformaciones máximas del análisis de elementos finitos, así como el error porcentual que hay entre los datos de la simulación con los datos de los ensayos.

Los resultados de bajo error porcentual de la tabla 3.4 permiten validar que las condiciones de contorno, la fuerza y el material están bien aplicados en el análisis de elementos finitos, estos resultados permiten optimizar el modelo del mecanismo.

3.14. Mejoramiento del modelo del mecanismo de rodilla

Luego de calibrar el modelo de elementos finitos se procede a realizar el mejoramiento del modelo del mecanismo de prótesis de rodilla, considerando:

- En las zonas donde se concentra la mayor carga, se debe evitar en lo posible reducir material.
- Aumentar los radios de redondeo en las aristas donde se concentra un mayor esfuerzo o carga.
- Aumentar las dimensiones de las ranuras para reducir material.
- Implementar redondeos en las aristas vivas.
- Reducir el espesor de la base y el móvil del mecanismo.
- El modelo del mecanismo propuesto debe tener un factor de seguridad mayor o igual a 3, considerando la carga máxima de la prueba estructural de la norma ISO 10328, especificada en la tabla 2.4.

3.14.1. Análisis del modelo original

La distribución de esfuerzos combinados se muestra en las figuras 3.26 a 3.36 con los colores verde, azul y rojo en sus diferentes tonos que representan la distribución de esfuerzos para un rango de 5,05 MPa hasta 25,250 MPa respectivamente.

El factor de seguridad es dependiente de la incertidumbre de las fuerzas que intervienen en el mecanismo, para un análisis de optimización en el mecanismo original, se ha considerado un factor de seguridad mínimo de 20 y máximo de 100 permite observar las zonas en donde se concentra la carga.

Si el factor de seguridad mínimo a considerar es 20 y el máximo es 100, aplicando la teoría de falla de la energía de distorsión, el esfuerzo que corresponde a los mencionados factores de seguridad son 25,25 MPa y 5,05 MPa respectivamente, teniendo en cuenta que el límite elástico de la aleación de aluminio 7075 es 505 MPa para la base y el móvil del mecanismo.

Las gráficas de distribución de esfuerzo permiten identificar el lugar donde se concentra la carga y se observa en las figuras 3.26 a 3.36 con color negro los valores de esfuerzo superiores a 25,25MPa y con color morado los valores de esfuerzo inferiores a 5.05 MPa. En la base del mecanismo se muestra algunos de los esfuerzos mediante círculos y recuadros, en las figuras 3.27 a 3.31 se detalla con más precisión la distribución de esfuerzos.

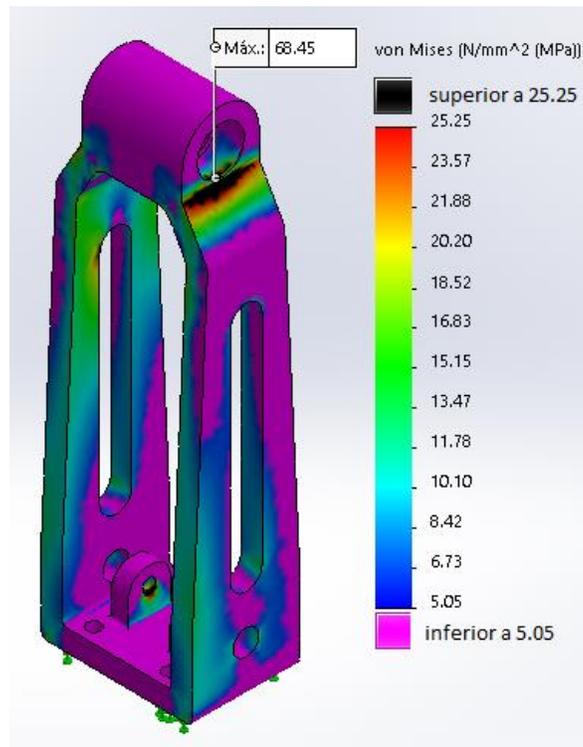


Figura 3.26. Distribución de esfuerzos en la base.

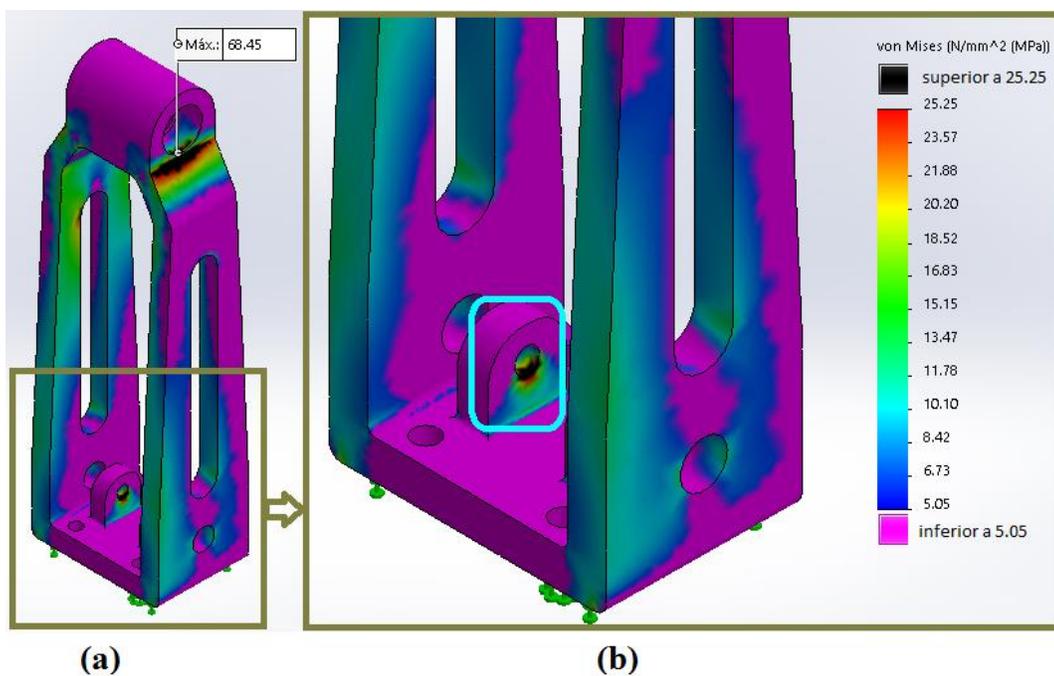


Figura 3.27. Distribución de esfuerzos en la base, (a) vista isométrica de la distribución de esfuerzos de la base, (b) detalle de la distribución de esfuerzos en la base

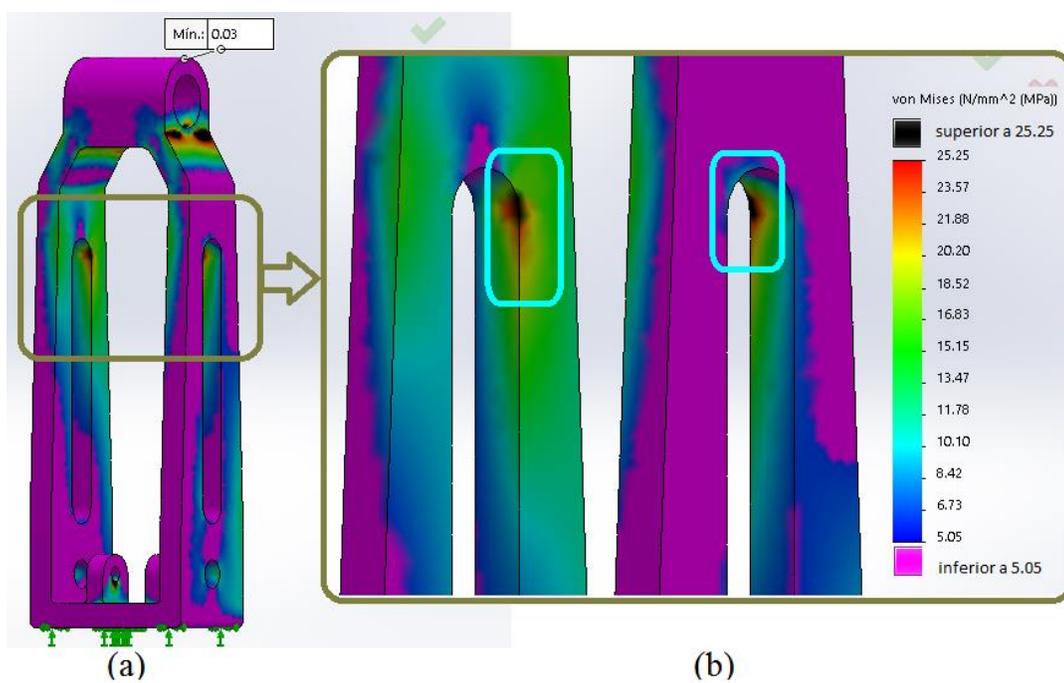


Figura 3.28. Distribución de esfuerzos en las ranuras, (a) vista isométrica de la base con información de las ranuras, (b) detalle de la distribución del esfuerzo en las ranuras.

En las figuras 3.27 y 3.28 se muestra la parte inferior de la base donde cruza el pasador del actuador y las ranuras laterales, respectivamente. En los mencionados lugares existe una elevada concentración de esfuerzo, de acuerdo a las condiciones de optimización se debería utilizar redondeos; sin embargo sería muy difícil desde el punto de vista de manufactura.

En la figura 3.28 se observa que el esfuerzo se concentra en las aristas de las transiciones geométricas, siendo imprescindible, de acuerdo a las condiciones mencionadas para la optimización, implementar redondeos en los lugares señalados con círculos de color azul.

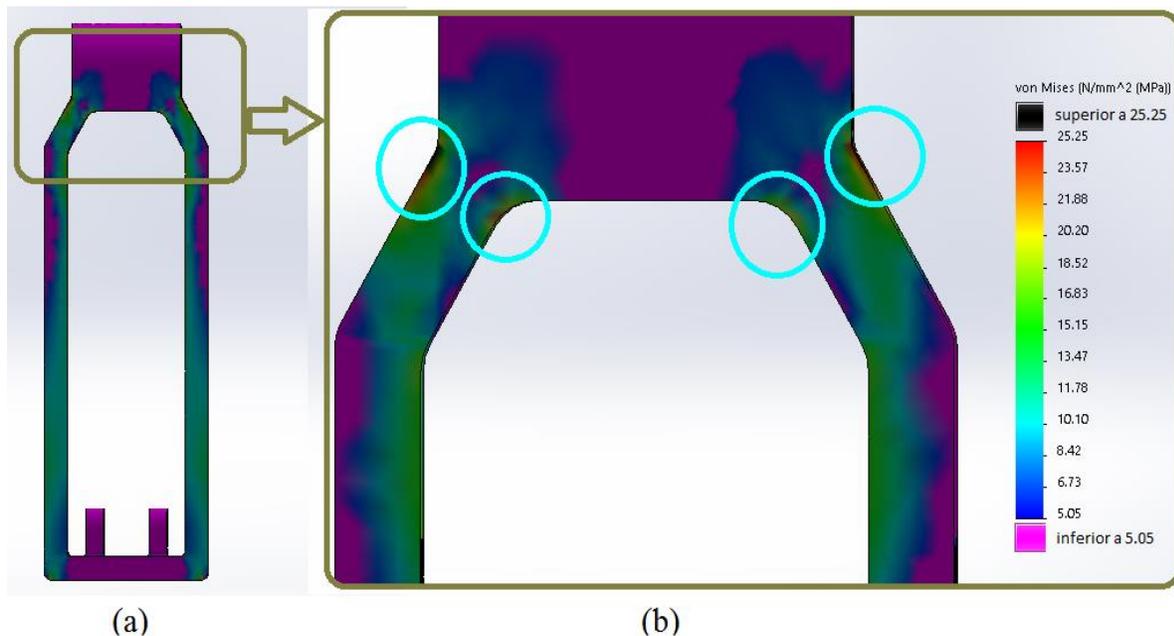


Figura 3.29. Distribución de esfuerzos en las zonas de transición geométricas, (a) vista frontal de la base con información de la distribución de esfuerzos en las zonas de transición geométricas, (b) detalle de la distribución de esfuerzos en las zonas de transición geométricas.

En las figuras 3.30 y 3.31 se observa que el esfuerzo se concentra en los radios de redondeos señalados con recuadros de color azul, siendo imprescindible aumentar los radios de redondeo en los lugares mencionados con el fin de obtener una distribución de esfuerzos en un área mayor.

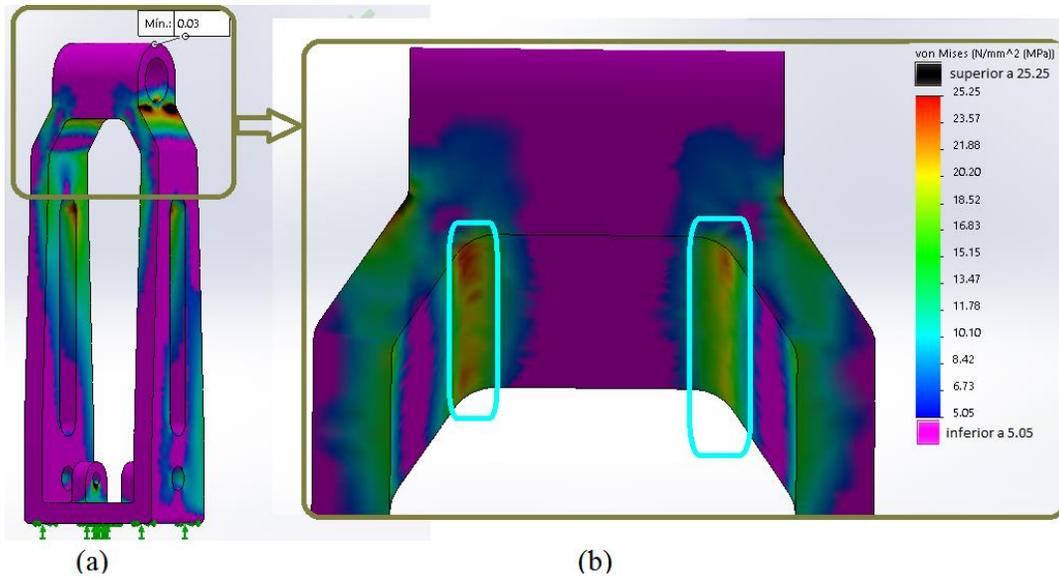


Figura 3.30. Distribución de los esfuerzos en las zonas de transición geométrica (a) vista isométrica de la base con información de la distribución de los esfuerzos en las zonas de transición geométrica, (b) detalle de la distribución de los esfuerzos en las zonas de transición geométrica.

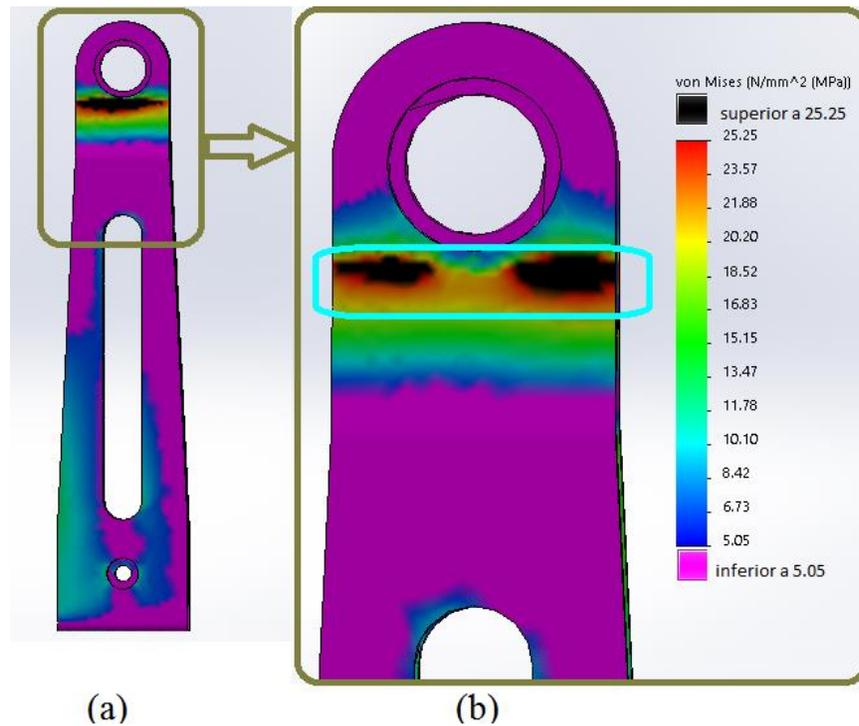


Figura 3.31. Distribución de esfuerzos en las zonas de transición geométrica, (a) vista derecha con información de la distribución de esfuerzos en las zonas de transición geométrica, (b) detalle de la distribución de esfuerzos en las zonas de transición geométrica.

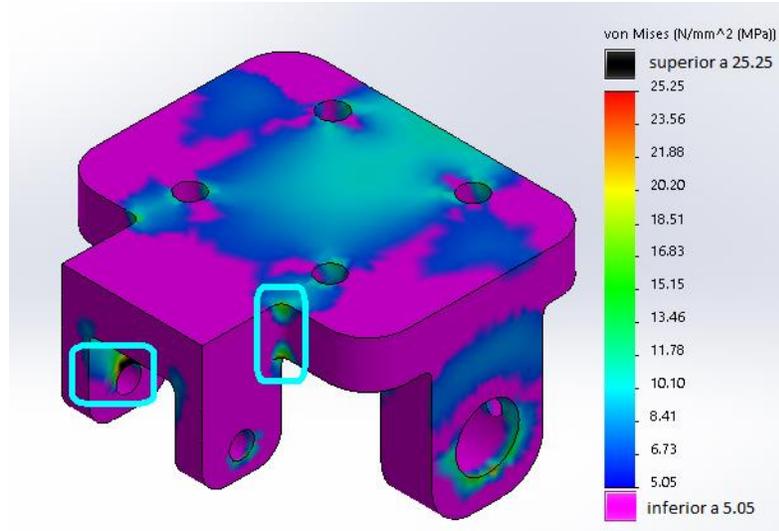


Figura 3.32. Distribución de esfuerzos en el móvil

En la figuras 3.33 a 3.36 se observa que el esfuerzo se concentra en algunas aristas redondeadas señalados con recuadros de color azul, siendo imprescindible de acuerdo a las condiciones mencionadas para la optimización, aumentar el radio de redondeo.

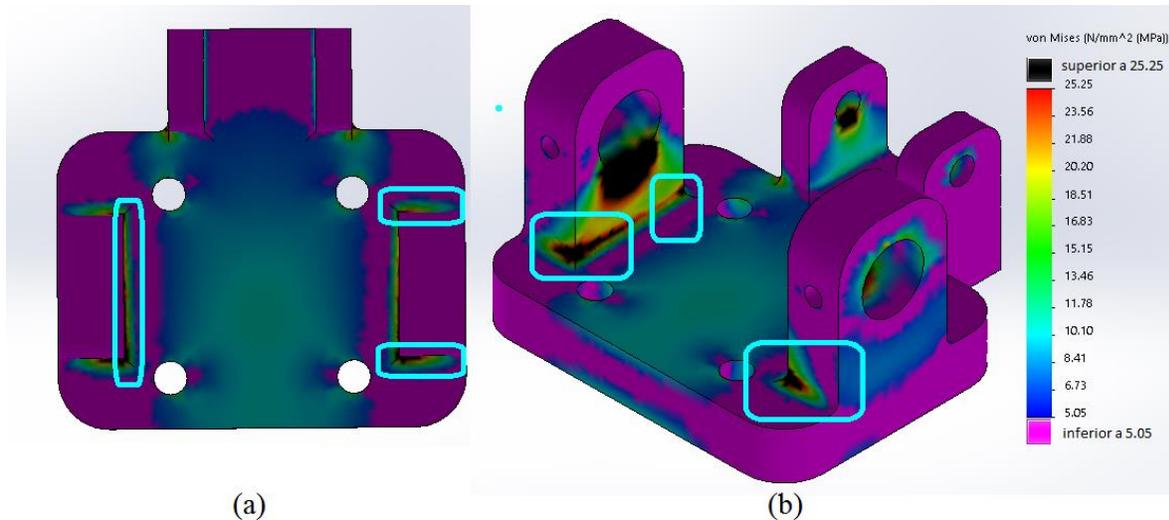


Figura 3.33. Distribución de esfuerzos en las zonas de transición geométrica, (a) distribución de esfuerzos en las zonas de transición geométrica vista superior, (b) distribución de esfuerzos en las zonas de transición geométrica vista derecha.

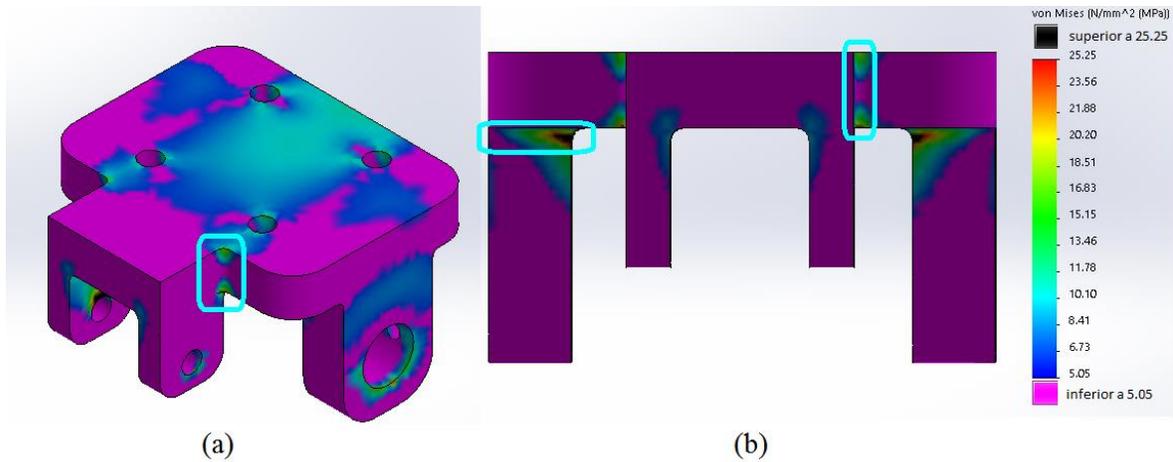


Figura 3.34. Distribución de esfuerzos en las zonas de transición geométrica, (a) Distribución de esfuerzos en las zonas de transición geométrica - vista isométrica, (b) distribución de esfuerzos en las zonas de transición geométrica – vista frontal

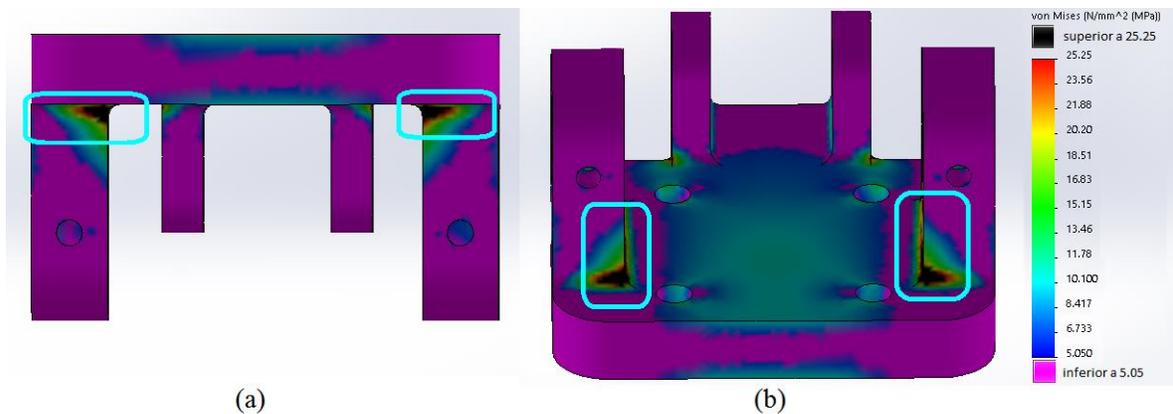


Figura 3.35. Distribución de esfuerzos en las zonas de transición geométrica, (a) Distribución de esfuerzos en las zonas de transición geométrica – vista posterior, (b) detalle de la distribución de esfuerzos en las zonas de transición geométrica – vista inferior.

En las figuras 3.36 se muestra la parte inferior del móvil detallando la zona donde cruzan los pasadores, en los mencionados lugares existe una elevada concentración de esfuerzo; de acuerdo a las condiciones de mejoramiento se debería utilizar redondeos, sin embargo sería muy difícil desde el punto de vista de manufactura.

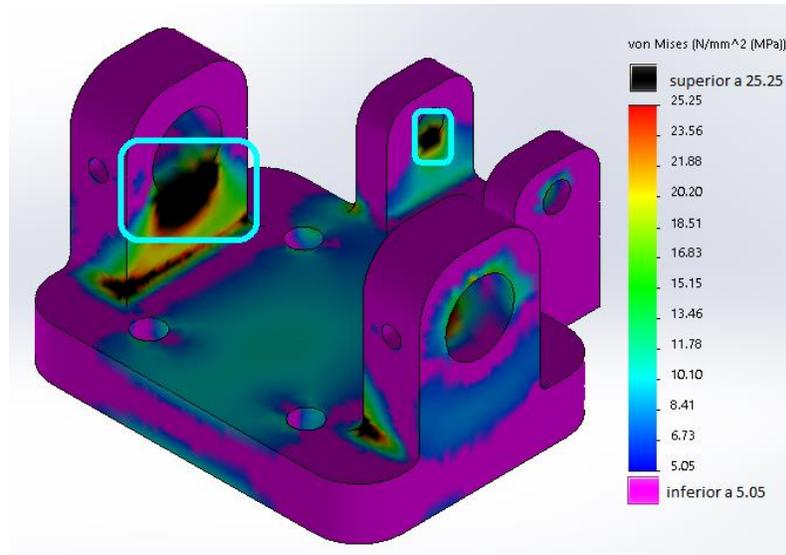


Figura 3.36. Distribución de esfuerzos en las zonas de transición geométrica - vista posterior inclinada hacia la izquierda

3.14.2. Modelo del mecanismo de rodilla mejorado.

Para mejorar el modelo del mecanismo de rodilla con énfasis en el factor de seguridad se utiliza la información de la sección 3.14 y se aplica las mejoras al modelo del mecanismo de rodilla.

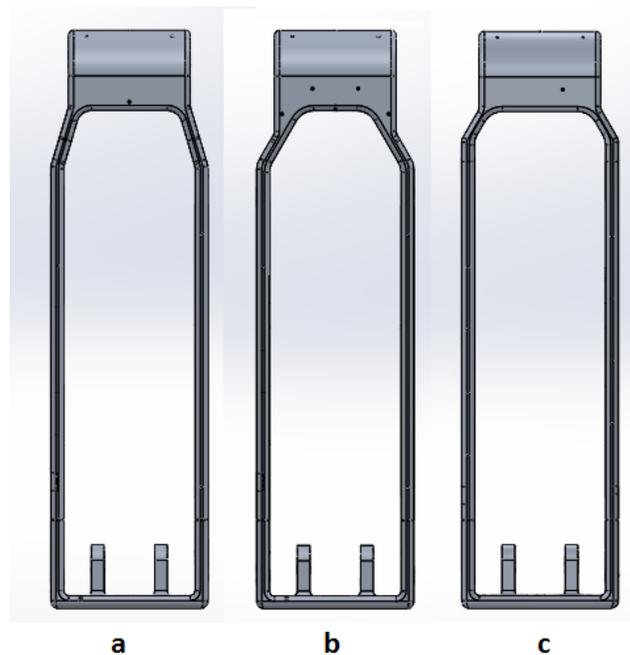


Figura 3.37. Modelos mejorados, (a) modelo A, (b) modelo B y (c) modelo C.

En la figura 3.37 se muestra tres modelos de la base del mecanismo de rodilla con modificaciones que disminuyen el peso del mecanismo y a su vez permitan que la distribución de esfuerzo sea más uniforme.

Con respecto al móvil del modelo del mecanismo de rodilla, se presenta solo un modelo con modificaciones como se muestra en la figura 3.38, ya que considerando la información de la sección 3.14 en el móvil es posible reducir el espesor del material y aumentar los radios de los redondeos.

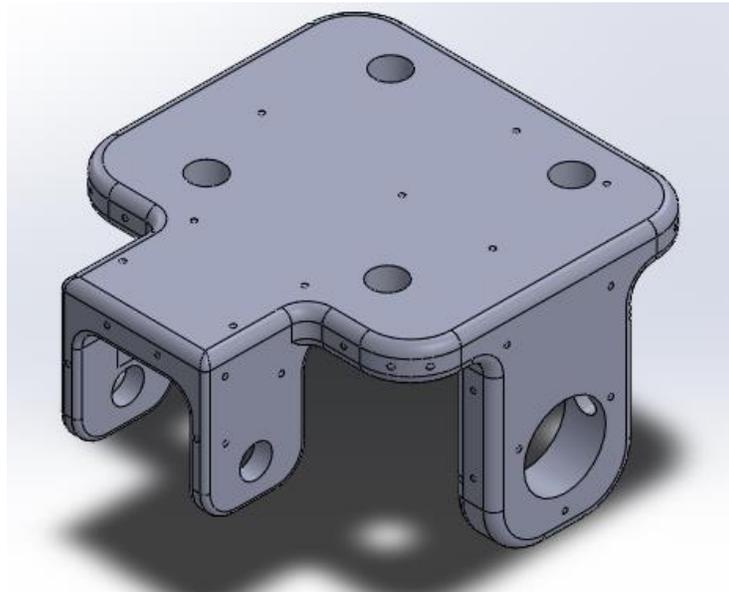


Figura 3.38. Móvil mejorado.

Con respecto a la manufactura, el modelo original del mecanismo de prótesis se mecanizó en una máquina CNC de tres ejes, el método de sujeción fue con una entenalla colocada en la bancada. Los cambios del modelo optimizado no modifican significativamente la geometría del modelo, el aumento de los radios en los redondeos y los redondeos en las aristas son fáciles de mecanizar en una máquina CNC de tres ejes.

En la tabla 3.5 se muestran los datos obtenidos de los modelos propuestos. De acuerdo a las condiciones de optimización señaladas en la sección 3.14, se selecciona el modelo C, porque presenta menor peso, y el factor de seguridad en los tres modelos es similar y superior al establecido para la optimización.

Tabla 3.5. Características de los modelos optimizados.

Datos	Piezas	Modelo Original	Modelo a	Modelo b	Modelo c
Peso (g)	Móvil	247,22	129,47	129,47	129,47
	Base	590,27	309,44	317,29	304,46
	Pasador 1	11,32	9,29	9,29	9,29
	Pasador 2	11,57	9,8	9,8	9,8
	Pasador 3	128,68	112,59	112,59	112,59
Peso Total del mecanismo (g)	Mecanismo de rodilla	989,06	570,59	578,44	565,61
Esfuerzo máximo (MPa)	Móvil	68,8	130,14	131,39	126,61
	Base	74,31	101,65	105,39	110,67
Factor de seguridad mínimo	Móvil	7,19	3,69	3,89	4,00
	Base	7,38	5,23	4,79	4,58
Fuerza (N)			4483		

En la figura 3.39 se muestra que se reduce el espesor de la base a la mitad, quedando en 5mm el espesor final. En la figura 3.40 se muestra el aumento de valores de radio en las zonas donde existía mayor concentración de esfuerzo y la implementación de valores de radio en las aristas vivas de color rojo.

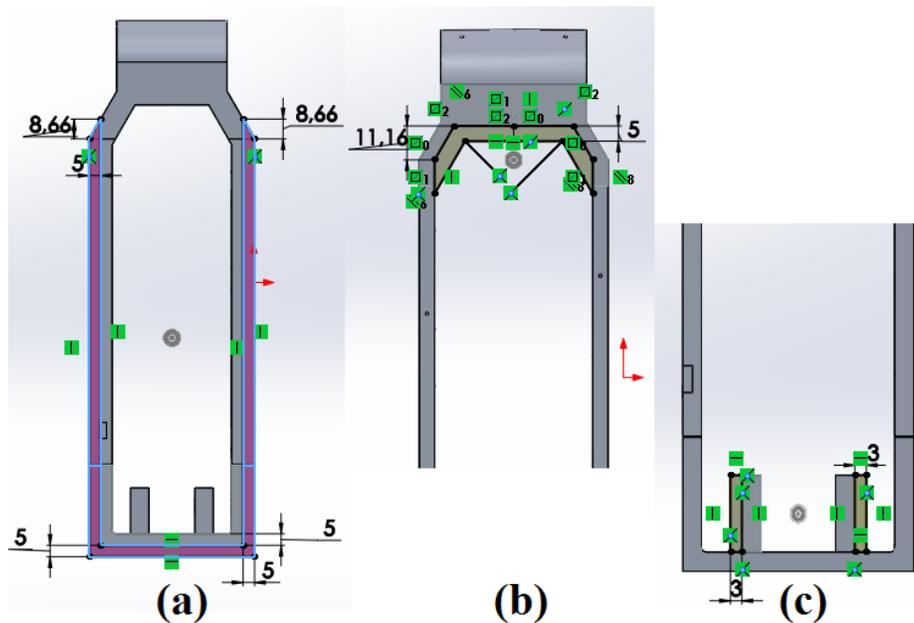


Figura 3.39. Reducción del material en la base, (a) corte del espesor externo, (b) corte del espesor interno, (c) corte de los soportes del pasador 2

En la figura 3.41 se muestra la reducción del material en las ranuras; por esta razón se consideró el modelo C porque permite retirar el material de la parte superior e inferior.

En las figuras a 3.39 a 3.41 se muestran los detalles de las modificaciones del modelo C.

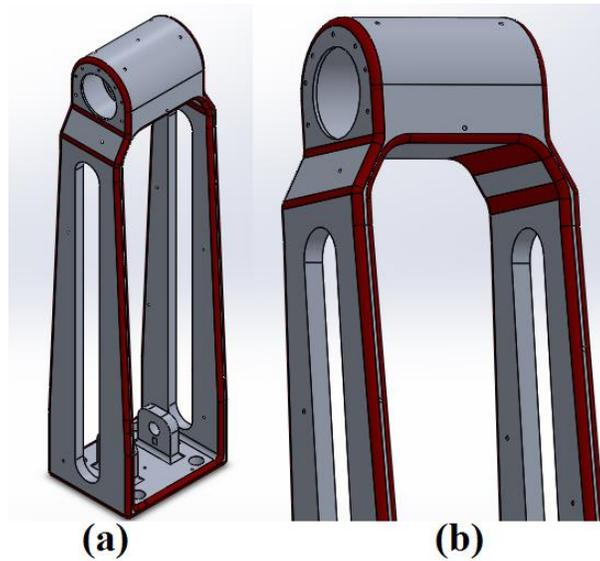


Figura 3.40. Redondeos del mecanismo optimizado, (a).vista isométrica, (b) vista frontal inclinada hacia la derecha.

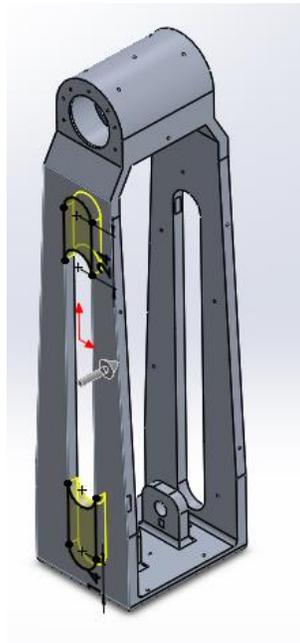


Figura 3.41. Reducción del material de las ranuras laterales.

En la figura 3.42 se muestra la reducción del espesor de la parte móvil del mecanismo. En el lugar donde se ubican los tornillos prisioneros, no se reduce a la mitad del espesor original debido a que no existiría suficiente espesor para taladrar.

La figura 3.43 muestra el aumento del redondeo de 2 mm a 4 mm en los lugares donde se concentra el esfuerzo y así obtener una mejor distribución de esfuerzos, los gráficos de esfuerzo para estos redondeos se muestran en la sección 3.14.1.

Las figuras 3.44 y 3.45 muestran redondeos externos e internos, respectivamente, de las aristas vivas del móvil, los redondeos son de 2 mm y mejoran la distribución de esfuerzos en el móvil.

Los resultados de los esfuerzos después de haber realizado las modificaciones al mecanismo se muestran en la sección 3.14.3.

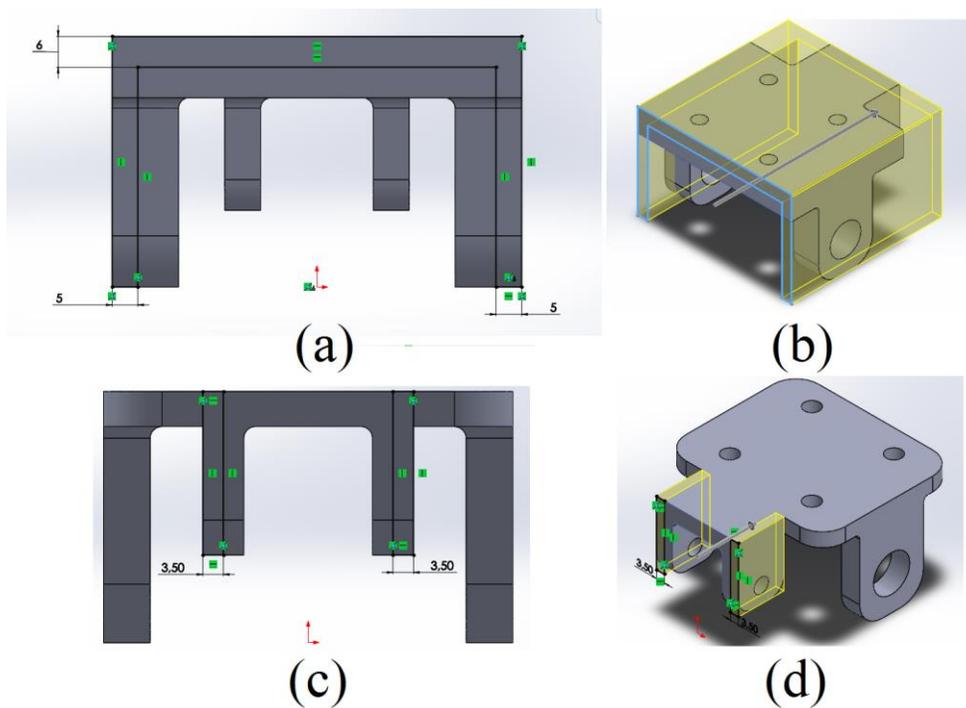


Figura 3.42. Reducción del espesor del móvil, (a) corte vista posterior, (b) corte vista isométrica posterior, (c) corte vista frontal, (d) corte frontal -vista isométrica frontal.

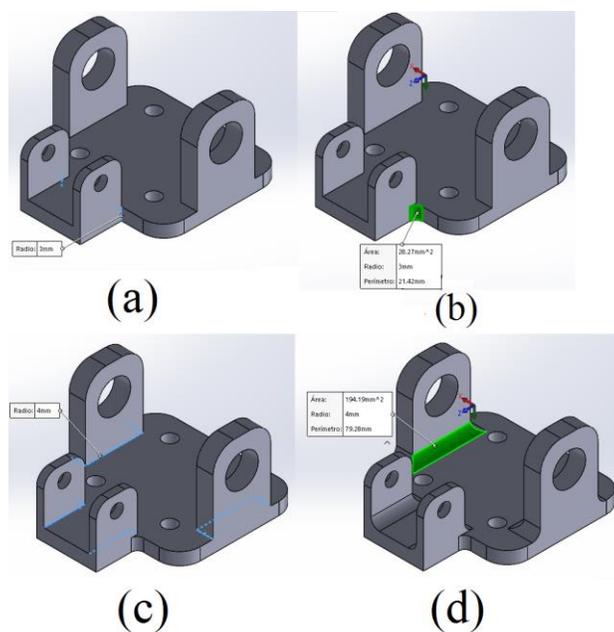


Figura 3.43. Aumento del radio de redondeo en concentradores de esfuerzo, (a) aristas externas vista isométrica inferior, (b) aumento de redondeos en las aristas externas vista isométrica inferior, (c) aristas internas vista isométrica inferior, (d) aumento de redondeos en las aristas internas vista isométrica inferior.

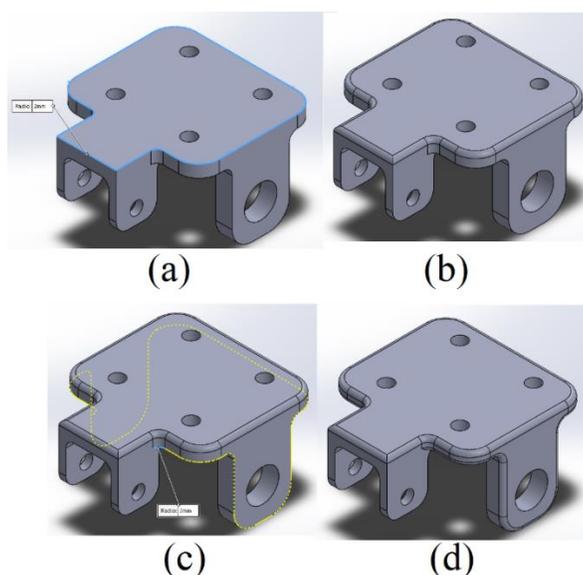


Figura 3.44. Redondeos externos de aristas vivas en el móvil. (a) Aristas superiores vista isométrica superior, (b) redondeos en las aristas vivas vista isométrica superior, (c) aristas inferiores vista isométrica superior, (d) redondeos en las aristas inferiores vista isométrica superior.

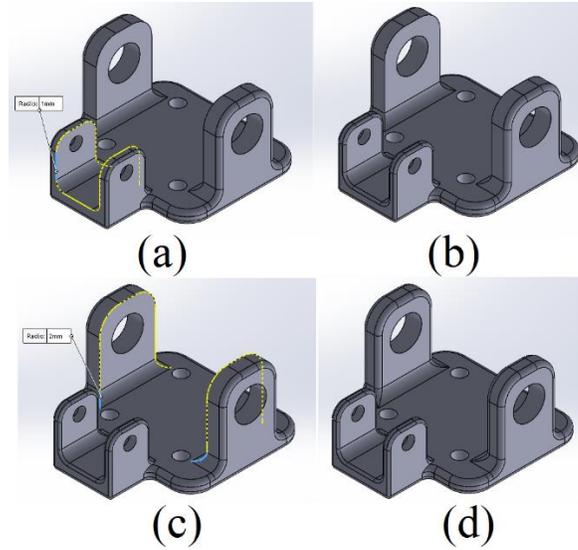


Figura 3.45. Redondeos internos de aristas vivas en el móvil. (a) Aristas internas vista isométrica inferior, (b) redondeos en las aristas internas vista isométrica inferior, (c) aristas internas vista isométrica inferior, (d) redondeos en las aristas internas vista isométrica inferior.

3.14.3. Validación del factor de seguridad.

Para comparar el factor de seguridad del modelo original con el modelo optimizado se toma varios puntos en la misma ubicación en los dos modelos, y se compara los resultados.

Se define la escala para el factor de seguridad, donde el color negro indica valores inferiores a 20 y el color morado valores superiores a 100 como se muestra en las figuras 3.46 a 3.55. Las mejoras del modelo se evidencian en la reducción de las zonas moradas y el incremento de las zonas negras.

Se toma el límite mínimo de 20 para poder visualizar con más facilidad los valores más bajos de factor de seguridad a partir de 20 y el límite máximo de 100 para visualizar únicamente los valores de factor de seguridad hasta 100. En la figura 3.46 a 3.49 se observa que se toma los mismos puntos en la base del modelo original y en el modelo optimizado para comparar los resultados del factor de seguridad, y se muestra en la figuras 3.49 y 3.47 que el factor de seguridad se reduce en la mayoría de los puntos a la mitad y se aprecia una mejor distribución del factor de seguridad.

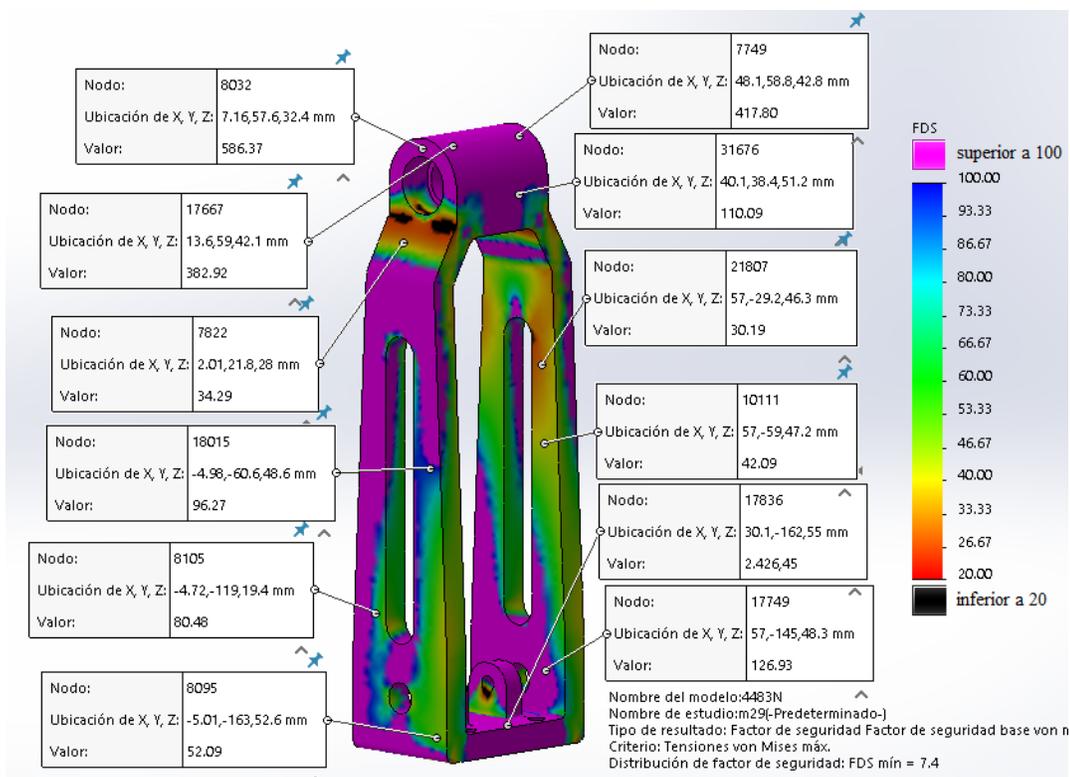


Figura 3.46. Análisis del factor de seguridad de la base del modelo original- vista 1.

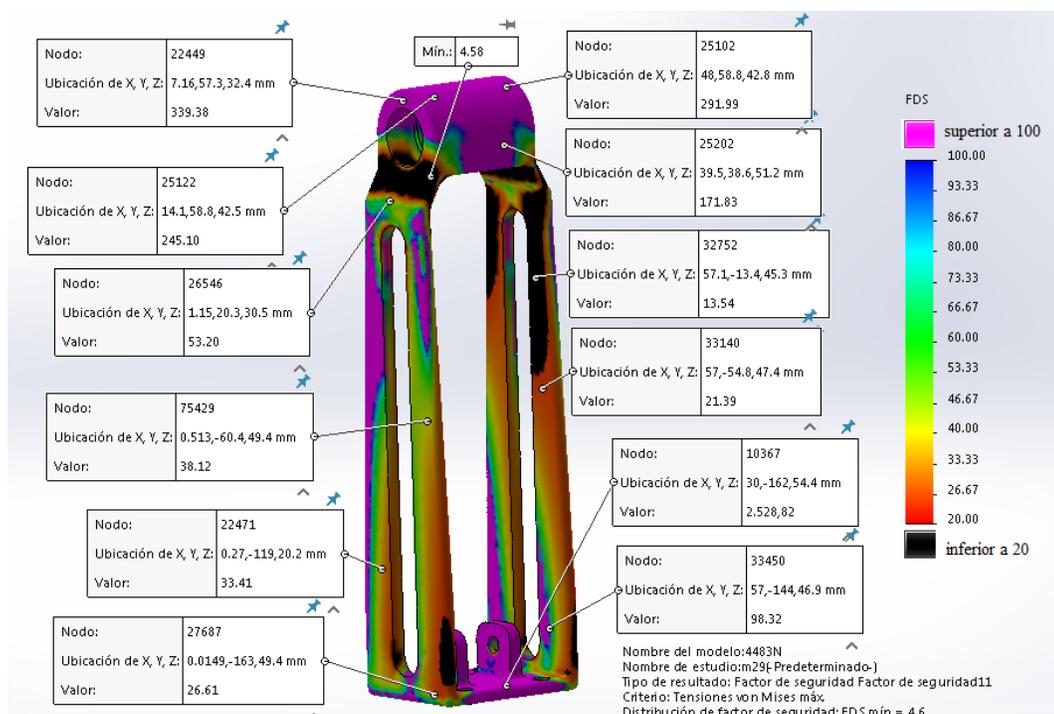


Figura 3.47. Análisis del factor de seguridad de la base del modelo optimizado - vista 1.

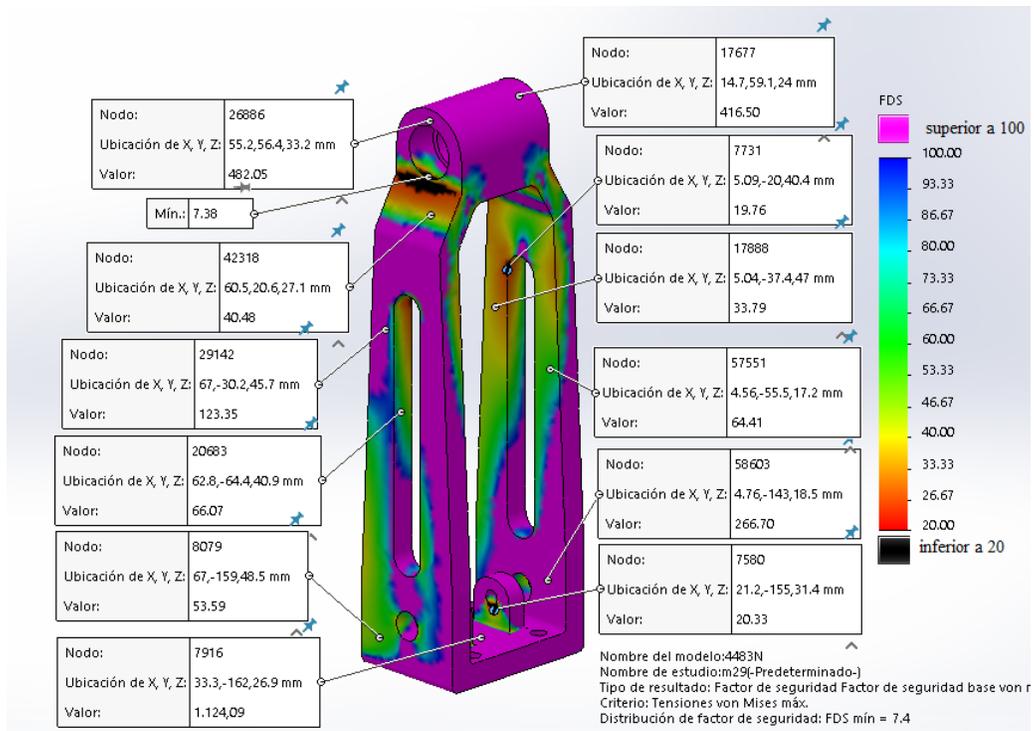


Figura 3.48. Análisis del factor de seguridad de la base del modelo original- vista 2.

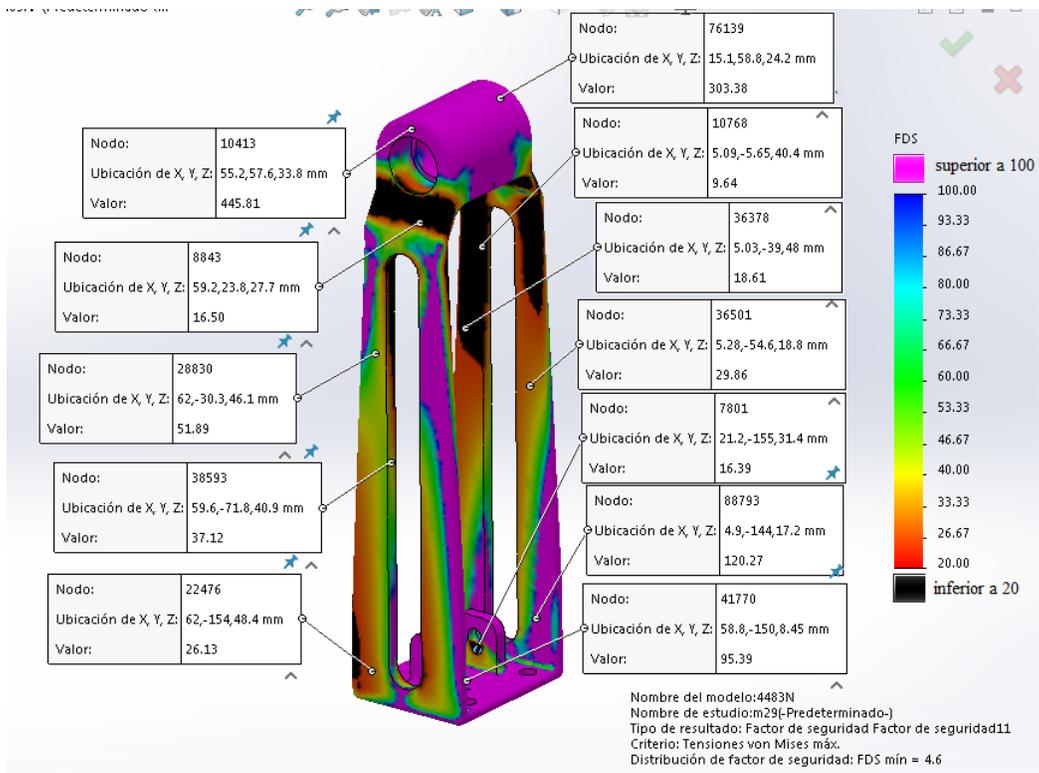


Figura 3.49. Análisis del factor de seguridad de la base del modelo optimizado- vista 2.

En las 3.50 a 3.55 se muestra los puntos del móvil del modelo del mecanismo original con respecto a los puntos del modelo del móvil optimizado, donde se observa que los puntos marcados en las mismas zonas indican que el factor de seguridad se reduce en la mayoría a la mitad y se aprecia una mejor distribución del factor de seguridad.

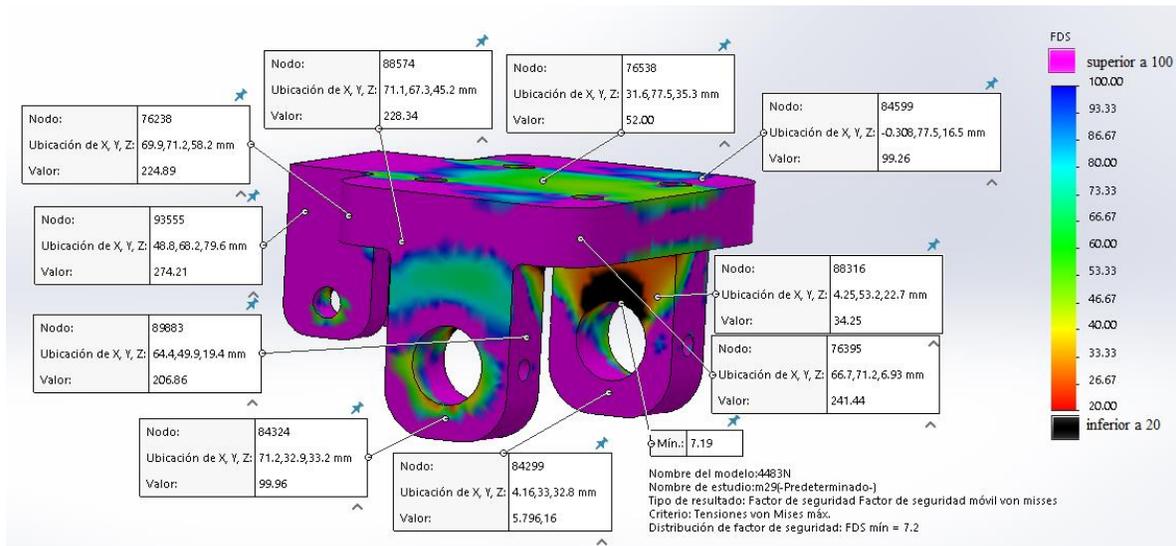


Figura 3.50. Análisis del factor de seguridad del móvil del modelo original- vista 1

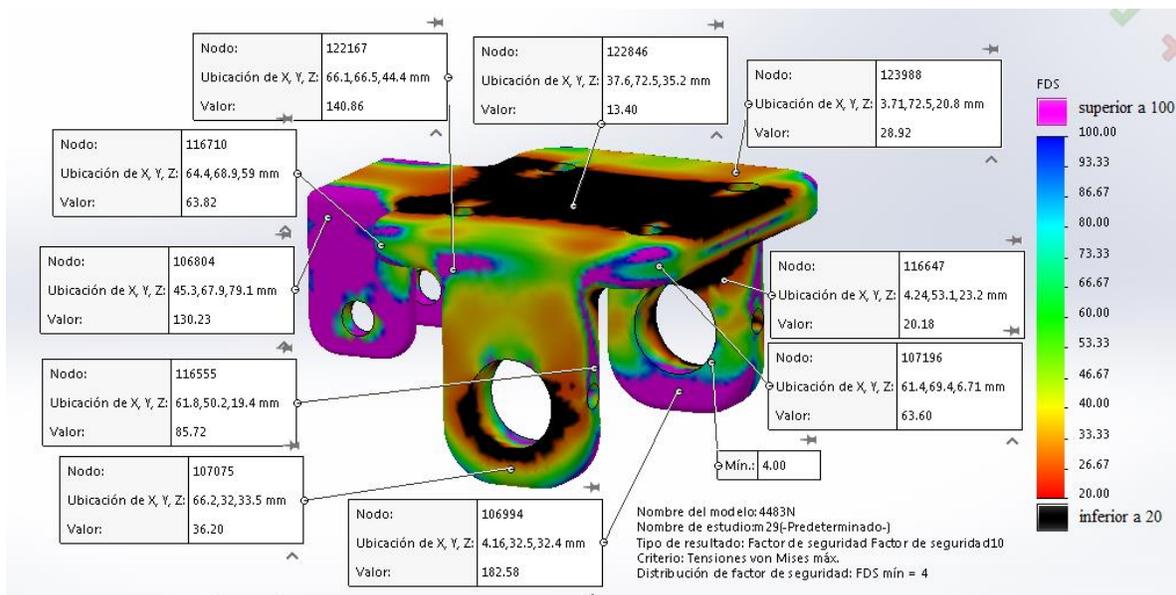


Figura 3.51. Análisis del factor de seguridad del móvil del modelo optimizado - vista 1.

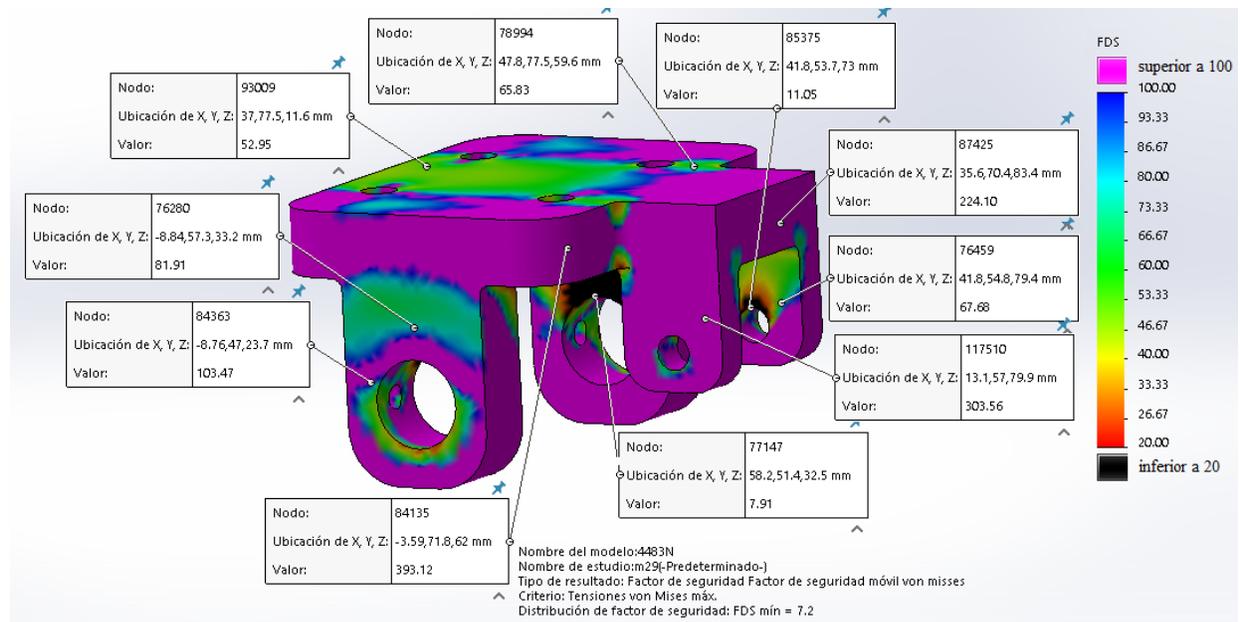


Figura 3.52. Análisis del factor de seguridad del móvil del modelo original- vista 2

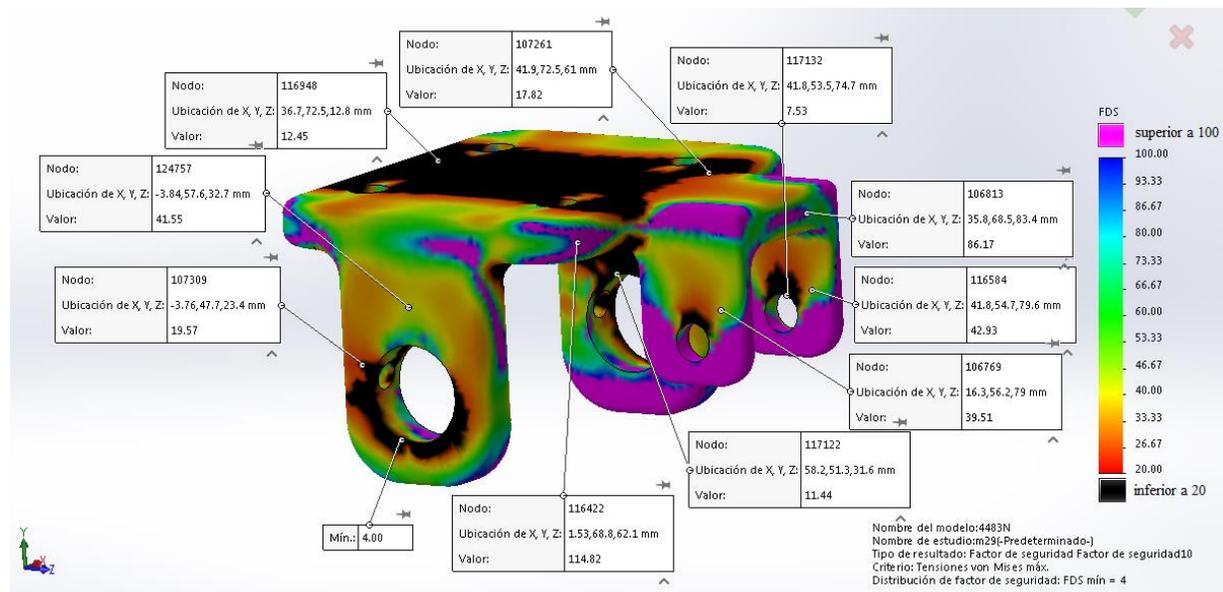


Figura 3.53. Análisis del factor de seguridad del móvil del modelo optimizado - vista 2.

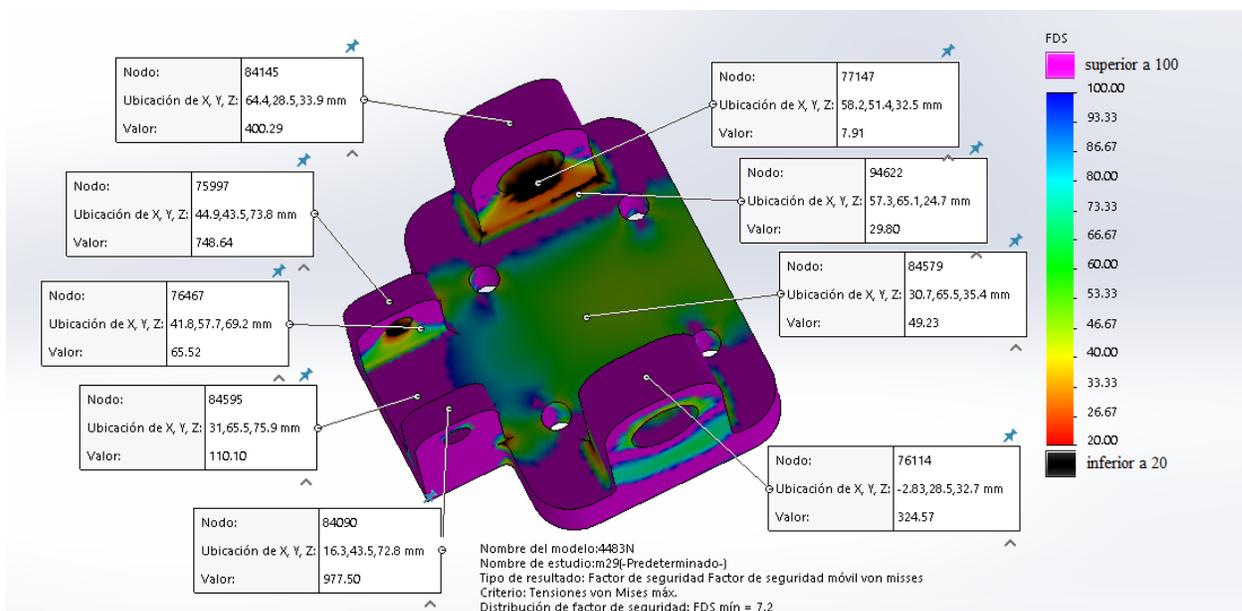


Figura 3.54. Análisis del factor de seguridad del móvil del modelo original- vista 3.

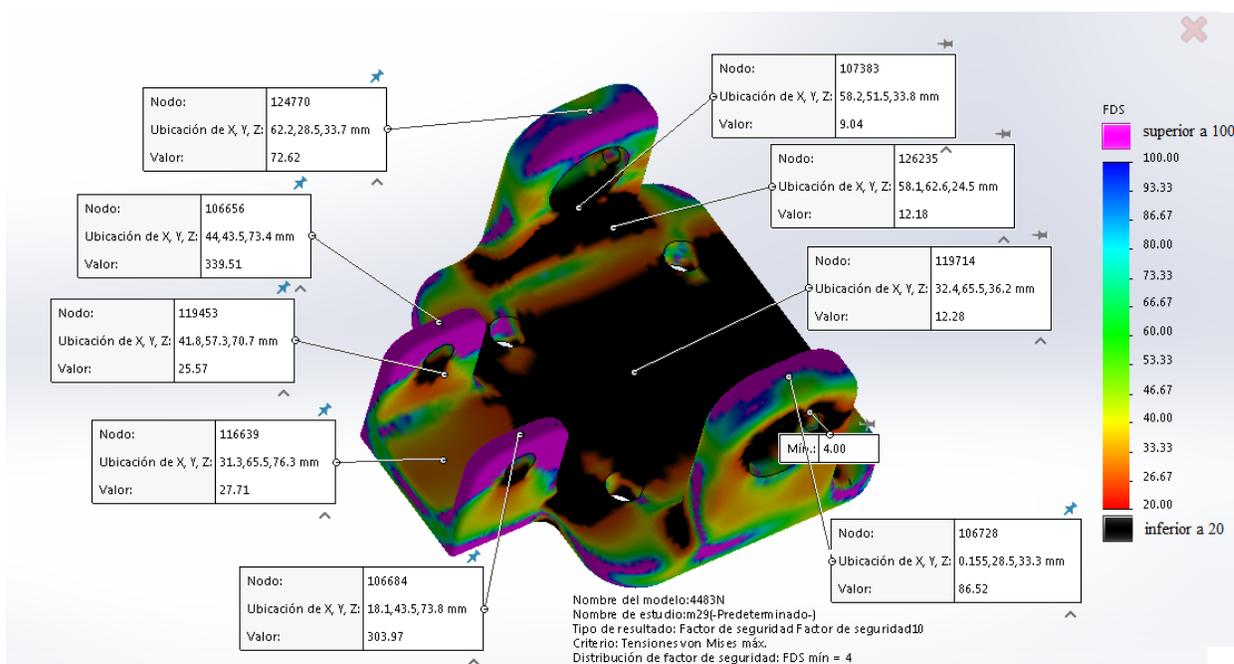


Figura 3.55. Análisis del factor de seguridad del móvil del modelo optimizado - vista 3.

3.15. Análisis de costos del proyecto

3.15.1. Costos directos de instrumentación.

En la tabla 3.6 se muestra los costos que intervinieron en la instrumentación de la prótesis para obtener las deformaciones del mecanismo cuando es sometido a un ensayo de compresión.

Tabla 3.6. Costos directos de instrumentación.

Detalles	Costos US (\$)
Galgas extensométricas	500
Amplificadores de instrumentación	80
Resina epóxica	8
Potenciómetros de precisión	40
Resistencias	2
Cable de utp categoría 5E	5
Total	635

3.15.2. Costos indirectos de instrumentación.

En la tabla 3.7 se muestra los costos que no intervinieron directamente en la instrumentación del mecanismo para obtener las deformaciones cuando es sometido a un ensayo de compresión.

Tabla 3.7. Costos indirectos de instrumentación.

Detalles	Costos (\$)
Estaño	1
Materiales de oficina	80
Internet	25
Transporte	120
Total	325

3.15.3. Costo total

La suma de costos directos y costos indirectos de instrumentación del dispositivo se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Costos totales.

Detalles	Costos US (\$)
Costos directos	633
Costos indirectos	325
Total	958

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

- La diferencia máxima entre los resultados de la simulación y los ensayos experimentales es de 12,43 %, lo cual permite validar el modelo para la simulación de otras condiciones de carga más complejas.
- Las condiciones de contorno aplicadas al modelo para el análisis de elementos finitos son correctas ya que a través del ensayo no destructivo se comprobó que las deformaciones se presentan en las mismas zonas por lo tanto es factible optimizar el modelo con las mismas condiciones de contorno.
- Las galgas extensométricas para el ensayo 1 presentan ruido eléctrico elevado y las deformaciones son muy pequeñas, por tal motivo no se puede ajustar la curva de deformaciones en el tiempo y no es factible utilizar estos datos.
- Es posible mejorar el modelo del mecanismo en relación al peso y a la uniformización del factor de seguridad, cumpliendo con los estándares de la prueba estructural de la carga máxima de la norma ISO 10328.
- En el mejoramiento del modelo del mecanismo se ha reducido el 42,82 % del material utilizado en el modelo original.

4.2. Recomendaciones

- Aislar los circuitos eléctricos de amplificación y filtrado implementados para el uso de las galgas extensométricas, para evitar ruido en las curvas de las señales.
- Cambiar el actuador por otro más liviano o de otro tipo de accionamiento que puede ser mecánico, o un servomotor de alto torque, ya que el peso del actuador representa el 42% del peso total del mecanismo.
- Se debe en lo posible utilizar los datos que presenten menos ruido para comparar con los resultados del análisis de elementos finitos.
- Se recomienda a futuro comprobar que el modelo optimizado cumple con los requerimientos de la norma ISO 10328, probando con personas protetizadas.

- Usar las normas para certificar el funcionamiento de dispositivos médicos a diseñar, tomar en consideración que las normas certifican la confiabilidad de dispositivos médicos en el proceso de diseño.

Bibliografía

- Amador, B., Müller, C., & Torrealba, R. (2014). *Structural rectification in the desing of polycentric knee prosthesis finite elements*. Táchira.
- Analog Devices. (2011). Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier AD620. Obtenido de <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>
- Asamblea Nacional República del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Montecristi: Asamblea Nacional República del Ecuador.
- Au, S., & Herr, H. (2008). Powered Ankle-Foot Prosthesis. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. doi:10.1109
- Cardona, J., & Oropeza, L. (2012). *Diseño de una prótesis externa de rodilla con sistema de frenado*. Naguanagua.
- Drang. (2010). *Bathroom scales and Robert Hooke*. Obtenido de <http://www.leancrew.com/all-this/2010/07/bathroom-scales-and-robert-hooke/>
- Forero, J. (2006). *Strain gages. Fundamentos y aplicaciones en resistencia de materiales*.
- Freddi, A., Olmi, G., & Cristofolini, L. (2015). *Experimental Stress Analysis for Materials and structures*. Obtenido de <https://books.google.com.ec/books?id=ULaTBwAAQBAJ&pg=PR10&lpg=PR10&dq=Alessandro+Cristofolini,+%26+Olmi,+2015&source=bl&ots=y6P63uPJ-n&sig=Xrg5ZyO-QLL2RibfJw6jGPYtMkQ&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiWh-qj6-LRAhXBRiYKHRxcDSgQ6AEIKjAC#v=onepage&q=Alessandro%20Cristo>
- Gálvez Díaz-Rubio, F. (2004). *Bandas Extensometricas*. Obtenido de https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/128720/mod_resource/content/1/Galgas1.pdf
- García, Araújo, Ferreira, & Oliveira. (2008). Adaptive Knee Joint Control for an Active Amputee Prosthesis. *IEEE Latin American Robotic Symposium*, 978-0-7695-3536-4. doi:10.1109

- Inaort. (2011). *Prótesis Transfemoral*. Obtenido de <http://protesisdepiernas.com.mx/protesis-transfemoral/>
- International Organization for Standardization. (2006). *Prosthetics -- Structural testing of lower-limb prostheses -- Requirements and test methods*. Obtenido de http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=70205
- Kyowa. (2011). *How strain gages work*. Obtenido de <https://www.kyowa-ei.co.jp/english/products/gages/pdf/howsgw.pdf>
- Kyowa. (2011). *Strain Gages*. Obtenido de <https://www.kyowa-ei.co.jp/english/products/gages/pdf/howsgw.pdf>
- Lima Trujillo , J. (2015). Mecanismo de Articulación de Rodilla para prototipo de prótesis externa Biomecatrónica. Ibarra, Ecuador.
- Lozano, Velázquez, & Zepeda. (2010). OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL DE FORMA EN EL DISEÑO DE CAVIDADES EN ELEMENTOS PLANOS MEDIANTE ALGORITMOS EVOLUTIVOS. 1143-1159. Obtenido de <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/3079/3008>
- Mercedes, M., & Mediavilla, E. (2010). *Instrumentación Electrónica: Transductores y Acondicionadores de señal*. Obtenido de <http://www.editorialuc.es/libro/instrumentacion-electronica-transductores-y-acondicionadores-de-senal>
- Ministerio de sanidad y consumo. (2003). *GUÍA DESCRIPTIVA DE ORTOPRÓTESIS*. Obtenido de <https://www.msssi.gob.es/profesionales/prestacionesSanitarias/CarteraDeServicios/ContenidoCS/6PrestacionOrtoprotesica/docs/GuiaDescriptivaOrtoprotesisTomo3.pdf>
- MINISTERIO DE SANIDAD Y CONSUMO. (2003). *GUÍA DESCRIPTIVA DE ORTOPRÓTESIS*. Obtenido de <https://www.msssi.gob.es/profesionales/prestacionesSanitarias/CarteraDeServicios/ContenidoCS/6PrestacionOrtoprotesica/docs/GuiaDescriptivaOrtoprotesisTomo3.pdf>
- Nationals Instruments. (2013). USER GUIDE AND SPECIFICATIONS NI myRIO-1900. Obtenido de <http://www.ni.com/pdf/manuals/376047a.pdf>
- Norton , R. (2008). *Diseño de máquinas*.

Omega. (2013). Precision Strain Gage.

Omega. (2015). *TRANSDUCER QUALITY STRAIN GAGE*.

OMEGA. (2015). *TRANSDUCER QUALITY STRAIN GAGE*.

OMEGA. (2016). *Colar Gage Datos técnicos*. España. Obtenido de <http://es.omega.com/prodinfo/galgas-extensiométricas.html>

Ortopedia Centroamericana. (s.f.). *Prótesis y aparatos ortopédicos de alta tecnología*. Obtenido de <http://www.ortopediacentroamericana.com/protesis.htm>

ÖSSUR. (2012). *Össur Catálogo Protésica*. Obtenido de http://www.grausoler.es/fileadmin/user_upload/fabricantes/ossur/prosthetic_ossur_10_2014b.pdf

OTTOBOCK. (2012). *Prosthetics*. Obtenido de [http://www.ottobock.es/media/cat%C3%A1logo-de-prot%C3%A9sica-miembro-inferior-\(gb\).pdf](http://www.ottobock.es/media/cat%C3%A1logo-de-prot%C3%A9sica-miembro-inferior-(gb).pdf)

Persico, D. (2016). OTROS RECURSOS DEL ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE TENSIONES. Obtenido de http://campus.fi.uba.ar/pluginfile.php/118153/mod_resource/content/1/10-AET-Clase%2010-2011%20110613.pdf

Rarick et al . (2014). Optimal Design of a Transfemoral Prosthesis with Energy Storage and Regeneration. *American Control Conference*, 4108.

Reglamento de Construcciones Sismorresistentes Nsr98 Tomo Uno. (1998).

Rodríguez, M. (2012). *Puente de Wheatstone*. Obtenido de <http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Puente%20de%20Wheatstone.pdf>

Russell, H. (2008). *Mecánica de Materiales*.

Schapiro, R. (2011). *Amputee is first civilian to get hi-tech, \$95,000 military-grade bionic leg*. Obtenido de <http://www.nydailynews.com/new-york/amputee-civilian-hi-tech-95-000-military-grade-bionic-leg-article-1.130845>

Shigley, J. E. (2008). *Diseño de Ingeniería mecánica*. México, D.F: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

Torrealba , R., Zambrano , L., & Messinger , G. (2012). *Optimization of knee exoprosthesis chassis using direct interaction betwee softwares of desing in 3d and stress analysis via FEM*. Caracas.