



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Optimización Topológica de  
los Knuckles para un  
vehículo todoterreno  
monoplaza tipo Baja SAE  
con aceleraciones reales**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

Raúl Bruce Rosete

**DIRECTOR DE TESIS**

M.I. César Abraham Luna Estrada



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

# **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme sus puertas ante infinitas posibilidades que ofrece. Estoy orgulloso de que sea mi alma mater.

A todos mis profesores de carrera y compañeros que me acompañaron en este viaje de formación como ingeniero, por todo el apoyo y los conocimientos transmitidos. Un agradecimiento especial a César Abraham Luna Estrada, quien tuvo la paciencia de ser mi tutor a pesar de mis repentinos ataques de ansiedad, gracias por las recomendaciones, las enseñanzas y por ser una gran persona.

A mis compañeros del equipo de Baja SAE por las risas, enojos y desvelos que pasamos. No sólo fueron la mejor parte de mi carrera, sino que fueron una familia para mí. Un agradecimiento especial a Arturo Juárez y Mariana Lara por aguantarme, y desvelarse conmigo, así como todo el esfuerzo y trabajo que le dedicaron al sistema de Masas No Suspendidas. Gracias por los recuerdos y ayudarme a crecer.

Muchas gracias a Ulises Guzmán, Gabriel Rodríguez, Luis Garrido, Juan Carlos Alarcón, Enrique Sánchez y Aranza Álvarez por una amistad que ha trascendido al equipo, y estar ahí en las buenas y en las malas. Se que nunca lo digo, pero los quiero mucho.

Muchas gracias a Fernando Merino, Hugo Martínez y Francisco Padilla, por ser mis mejores amigos desde la secundaria. Gracias por seguir aquí conmigo, son muy importantes para mí.

A Aranza Álvarez, por todo el cariño, creer en mí, y siempre estar ahí para mí. Gracias por ser mi compañera en este viaje y por ese gran corazón que tienes. Vayamos por más recuerdos y experiencias juntos.

A mis tíos, Chucho y Alejandro, por todas las conversaciones que hemos tenido que me han mostrado lo mucho que me falta por aprender, y a mis primos por jugar conmigo. A mi abuelita, a quien admiro por ser fuerte y no dejarse de nadie, y por las noches de box que hemos visto, y a mis tías, Laura y Elsa, por cuidarme desde pequeño y aguantar mis berrinches.

Finalmente, a mi hermana Citlali, por siempre molestarme y el cariño que me has dado, a mi papá, la persona que más admiro por su inteligencia y humor, y a mi mamá, por todo el amor y apoyo que me has dado. Gracias por todo, los amo y espero tener muchas más aventuras con ustedes.

# ÍNDICE

<b>I. I. Retos con el diseño de los Knuckles</b>	<b>9</b>
I.I. I. Problemática	9
I.I. II. ¿Qué es un Knuckle?	14
<b>I. II. Baja SAE®</b>	<b>17</b>
I.II. I. SAE®	17
I.II. II. Baja SAE®	18
I.II.II. I. Tech Inspection y Pruebas Estáticas	18
I.II.II. II. Pruebas Dinámicas	19
I.II.II. III. Endurance	20
I.II. III. Baja SAE® UNAM	20
<b>I. III. Objetivos y Alcances</b>	<b>21</b>
I.III. I. Valores Objetivo para Validaciones del Componente	23
<b>II. I. Método de Elementos Finitos</b>	<b>24</b>
<b>II. II. Análisis Modal</b>	<b>26</b>
<b>II. III. Optimización Estructural</b>	<b>28</b>
II.III. I. Optimización Paramétrica	28
II.III. II. Optimización de Forma	29
II.III. III. Optimización Topológica	29
<b>II. IV. Fatiga y criterios de vida infinita</b>	<b>33</b>
II.IV. I. Fatiga Completamente Reversible	33
II.IV. II. Fatiga Fluctuante/ Variable	33
<b>III. I. Fundamentos del Equipo</b>	<b>38</b>
III.I. I. Casos Críticos del Knuckle	38
III.I.I. I. Caso Crítico 1: Salto	39
III.I.I. II. Caso Crítico 2: Curva	40
III.I.I. III. Caso Crítico 3: Bajada	40
III.I.I. IV. Caso Crítico 4: Frenado con Impacto	41
III.I.I. V. Caso Crítico 5: Frenado en Curva	42
III.I. II. Diagramas de Cuerpo Libre	45
III.I.II. I. <i>Knuckle</i> Delantero	45
III.I.II. II. <i>Knuckle</i> Trasero	47

<b>III. II. Optimización Estructural del Knuckle Delantero</b>	<b>49</b>
III.II. I. Función Objetivo	49
III.II. II. Restricciones de Equilibrio	50
III.II. III. Restricciones de Tensiones y Deformaciones	51
III.II. IV. Restricciones de Geometría	51
III.II. V. Salidas	52
<b>III. III. Optimización Estructural del Knuckle Trasero</b>	<b>54</b>
III.III. I. Función Objetivo	54
III.III. II. Restricciones de Equilibrio	55
III.III. III. Restricciones de Tensiones y Deformaciones	56
III.III. IV. Restricciones de Geometría	56
III.III. V. Salidas	56
<b>IV. I. Validaciones a realizar</b>	<b>58</b>
<b>IV. II. Validaciones Finales del Knuckle Delantero</b>	<b>60</b>
IV.II. I. Análisis Estáticos	60
IV.II. II. Análisis de Fatiga	63
IV.II.II. I. Obtención de Aceleraciones	63
IV.II.II. II. Análisis Modal	65
IV.II.II. III. Análisis de Fatiga	67
<b>IV. III. Validaciones Finales del Knuckle Trasero</b>	<b>70</b>
IV.III. I. Análisis Estáticos	70
IV.III. II. Análisis de Fatiga	73
IV.III.II. I. Obtención de Aceleraciones	73
IV.III.II. II. Análisis Modal	74
IV.III.II. III. Análisis de Fatiga	76
<b>V. I. Conclusiones</b>	<b>80</b>
<b>VI. I. Bibliografía y Cibergrafía consultada</b>	<b>82</b>
<b>A. I. Propósito del Protocolo de Pruebas Físicas para un vehículo tipo Baja</b>	<b>87</b>
<b>A. II. Materiales e Instrumentación</b>	<b>87</b>
A.II. I. Infraestructura e Instalaciones	87
A.II. II. Equipo necesario para las pruebas	87
A.II. III. Instrumentación	88
<b>A. III. Condiciones de Seguridad</b>	<b>89</b>
A.III. I. Acciones a realizar	89

A.III.	II. Elementos a tener presente durante las pruebas	89
A.III.	III. Condiciones que el vehículo debe cumplir	90
<b>A.</b>	<b>IV. Descripción de la Prueba</b>	<b>90</b>
A.IV.	I. Prueba de Aceleración	90
A.IV.	II. Prueba de Pendiente Subida	90
A.IV.	III. Prueba de Pendiente Bajada	91
A.IV.	IV. Prueba de Arrastre	91
A.IV.	V. Prueba de Endurance	91
<b>A.</b>	<b>V. Preparaciones previas a las pruebas</b>	<b>92</b>
A.V.	I. Preparación de la pista A:	92
A.V.	II. Preparación de la pista B:	93
A.V.	III. Preparación de la pista C:	95
A.V.	IV. Preparación del Vehículo:	97
A.V.	V. Preparación del Piloto	98
<b>A.</b>	<b>VI. Pruebas</b>	<b>99</b>
A.VI.	I. Prueba de Aceleración:	99
A.VI.I.	I. Formato de Recolección de datos para Aceleración	99
A.VI.	II. Prueba de Frenado:	102
A.VI.II.	I. Formato de Recolección de datos para Frenado	103
A.VI.	III. Prueba de Pendiente (Subida y bajada):	106
A.VI.III.	I. Formato de Recolección de datos para Pendiente Subida	107
A.VI.III.	II. Formato de Recolección de datos para Pendiente Bajada	109
A.VI.	IV. Prueba de Suspensión:	111
A.VI.IV.	I. Formato de Recolección de datos para Suspensión	112
A.VI.	V. Prueba de Arrastre:	116
A.VI.V.	I. Formato de Recolección de datos para Arrastre	116
A.VI.	VI. Prueba de Maniobrabilidad:	119
A.VI.VI.	I. Formato de Recolección de datos para Maniobrabilidad	120
A.VI.	VII. Prueba de Endurance:	124
<b>B.</b>	<b>I. Paso 1 – Generar Matriz de Decisión</b>	<b>125</b>
B.I.	I. Paso 1.a - Lluvia de Ideas	125
B.I.	II. Paso 1.b – Priorización de Criterios	126
B.I.	III. Paso 1.c – Llenando las Pruebas	128
<b>B.</b>	<b>II. Paso 2 – Analizar los criterios</b>	<b>129</b>
<b>B.</b>	<b>III. Paso 3 – Colocar Factores</b>	<b>132</b>

<b>B.</b>	<b>IV. Paso 4 – Diseñar la pista</b>	<b>134</b>
<b>C.</b>	<b>I. Planos del Knuckle Delantero</b>	<b>137</b>
<b>C.</b>	<b>II. Planos del Knuckle Trasero</b>	<b>139</b>
<b>D.</b>	<b>I. Proceso de Manufactura del Knuckle Delantero</b>	<b>141</b>
D.I.	I. Paso 1- Comprar Material	141
D.I.I.	I. Máquinas, herramienta y Equipo de Seguridad	141
D.I.I.	II. Descripción del Paso	141
D.I.	II. Paso 2- Generar barreno inicial	142
D.I.II.	I. Máquinas, herramientas y Equipo de Seguridad	142
D.I.II.	II. Descripción del Paso	142
D.I.	III. Paso 3 – Manufacturar barreno para el rodamiento	144
D.I.III.	I. Máquinas, herramienta y Equipo de Seguridad	144
D.I.III.	II. Descripción del Paso	144
D.I.	IV. Paso 4 – Eliminar material sobrante de la solera	145
D.I.IV.	I. Máquinas, herramienta y Equipo de Seguridad	145
D.I.IV.	II. Descripción del Paso	145
D.I.	V. Paso 5 – Generar el soporte para el Ball Joint	147
D.I.V.	I. Máquinas y herramientas y Equipo de Seguridad	147
D.I.V.	II. Descripción del Paso	147
D.I.	VI. Paso 6 – Barrenar para Tapa del Knuckle	148
D.I.VI.	I. Máquinas y herramientas por usar	148
D.I.VI.	II. Descripción del Paso	148
D.I.	VII. Paso 7 – Barrenar para Portacaliper	149
D.I.VII.	I. Máquinas y herramientas por usar	149
D.I.VII.	II. Descripción del Paso	149
D.I.	VIII. Paso 8 – Generar Geometría Externa	150
D.I.VIII.	I. Máquinas, herramienta y Equipo de Seguridad	150
D.I.VIII.	II. Descripción del Paso	150
D.I.	IX. Paso 9 – Barrenar para Brazo Tipo A Inferior	151
D.I.IX.	I. Máquinas y herramientas por usar	151
D.I.IX.	II. Descripción del Paso	151
D.I.	X. Paso 10 – Barrenar para Bieleta de la Dirección	152
D.I.X.	I. Máquinas, herramienta y Equipo de Seguridad	152

D.I.X.	II. Descripción del Paso _____	152
D.I.	XI. Paso 11 – Corregir Pestaña de la Dirección _____	154
D.I.XI.	I. Máquinas y herramientas por usar _____	154
D.I.X.	II. Descripción del Paso _____	154
D.I.	XII. Paso 12 – Limpieza post-manufactura del Knuckle _____	155
D.I.X.	I. Máquinas, herramienta y Equipo de Seguridad _____	155
D.II.X.	II. Descripción del Paso _____	156
<b>D.</b>	<b>II. Proceso de Manufactura del Knuckle Trasero _____</b>	<b>157</b>
D.II.	I. Paso 1- Comprar Material _____	157
D.II.I.	I. Máquinas y herramientas por usar _____	157
D.II.I.	II. Descripción del Paso _____	157
D.II.	II. Paso 2- Generar barreno inicial _____	158
D.II.II.	I. Máquinas, herramientas y Equipo de Seguridad _____	158
D.II.II.	II. Descripción del Paso _____	158
D.II.	III. Paso 3 – Manufacturar barreno para el rodamiento _____	159
D.II.III.	I. Máquinas, herramientas y Equipo de Seguridad _____	159
D.II.III.	II. Descripción del Paso _____	160
D.II.	IV. Paso 4 – Eliminar material sobrante de la solera (Cara Trasera) _____	160
D.II.IV.	I. Máquinas, herramientas y Equipo de Seguridad _____	160
D.II.IV.	II. Descripción del Paso _____	161
D.II.	V. Paso 5 – Eliminar material sobrante de la solera (Cara Delantera) _____	162
D.II.V.	I. Máquinas, herramientas y Equipo de Seguridad _____	162
D.II.V.	II. Descripción del Paso _____	162
D.II.	VI. Paso 6 – Barrenar Portacaliper _____	163
D.II.VI.	I. Máquinas y herramientas por usar _____	163
D.II.VI.	II. Descripción del Paso _____	164
D.II.	VII. Paso 7 – Generar Geometría Externa _____	164
D.II.VII.	I. Máquinas, herramientas y Equipo de Seguridad _____	164
D.II.VII.	II. Descripción del Paso _____	165
D.II.	VIII. Paso 8 – Barrenar Pestañas para Brazo Seguidor _____	165
D.II.VIII.	I. Máquinas, herramientas y Equipo de Seguridad _____	165
D.II.VIII.	II. Descripción del Paso _____	166
D.II.	IX. Paso 9 – Barrenar Pestañas para Brazo H _____	166
D.II.IX.	I. Máquinas y herramientas por usar _____	166

D.II.IX.	II. Descripción del Paso _____	167
D.II.	X. Paso 10 – Limpieza post-manufactura del Knuckle _____	168
D.II.X.	I. Máquinas y herramientas por usar _____	168
D.II.X.	II. Descripción del Paso _____	168
<b>E.</b>	<b>I. Pistas _____</b>	<b>169</b>
<b>E.</b>	<b>II. Obtención de Frecuencias – Pista pequeña en C.U. – Pavimento Mojado (Lluvia)</b>	<b>170</b>
<b>E.</b>	<b>III. Obtención de Frecuencias – Pista pequeña en C.U. – Pavimento Seco _____</b>	<b>174</b>
<b>E.</b>	<b>IV. Obtención de Frecuencias – Pista grande en C.U. – Pavimento Mojado (Lluvia)</b>	<b>176</b>
<b>E.</b>	<b>V. Obtención de Frecuencias – Pista grande en C.U. – Pavimento Seco _____</b>	<b>179</b>

# Capítulo I. Introducción

## I. I. Retos con el diseño de los Knuckles

### I.I. I. Problemática

Durante el desarrollo del 4WD para México 2021, el equipo de Baja SAE® no obtuvo los resultados esperados. Esto se define, debido a que como objetivos de equipo de la competencia se tenían:

- **Objetivo 1:** Obtener mínimo o superar el puntaje obtenido en la prueba de **Pendiente** en la competencia presencial anterior (Bajío 2020) de 22.95
  - **Resultado Objetivo 1:** Puntaje obtenido de 14.41 en México 2021; Objetivo no cumplido

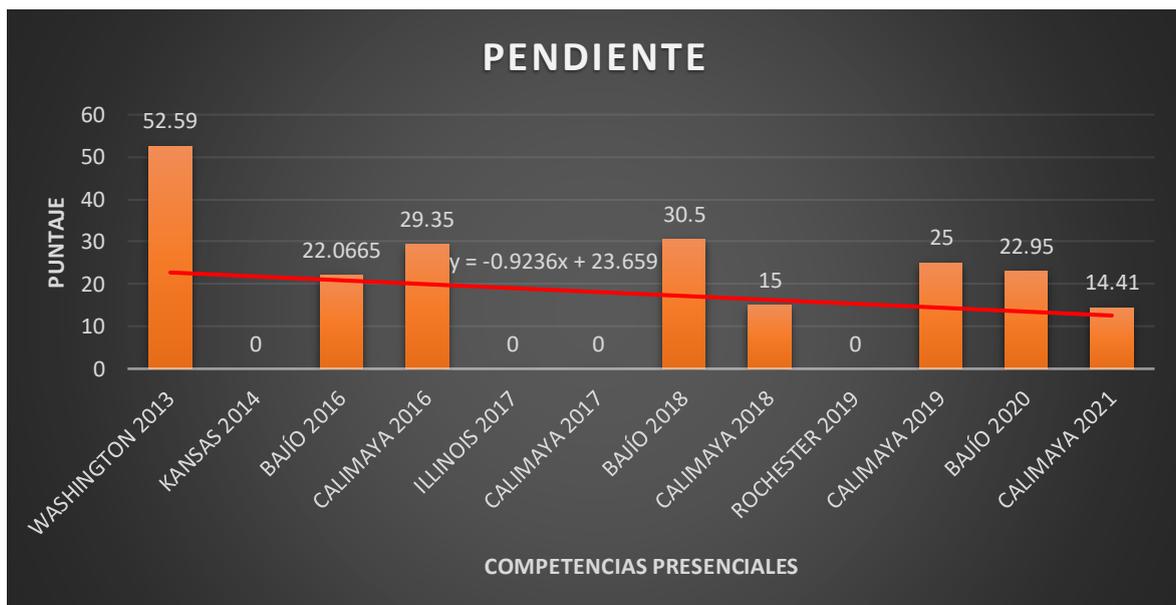
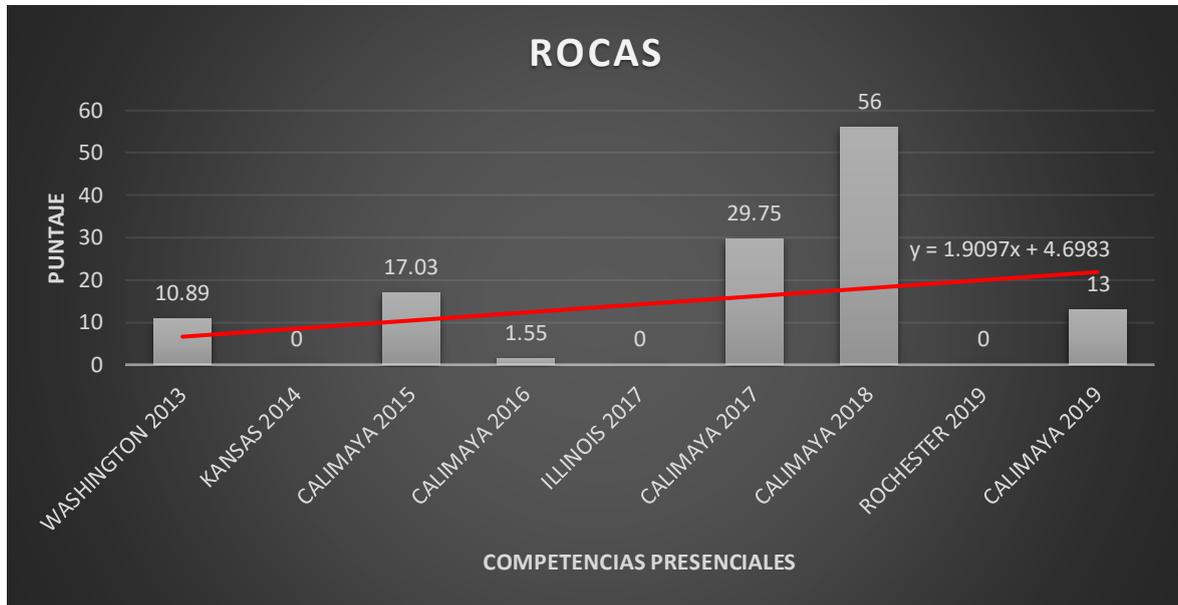


Figura 1.1 - Puntajes de la Prueba de *Pendiente* desde Washington 2013 hasta México 2021

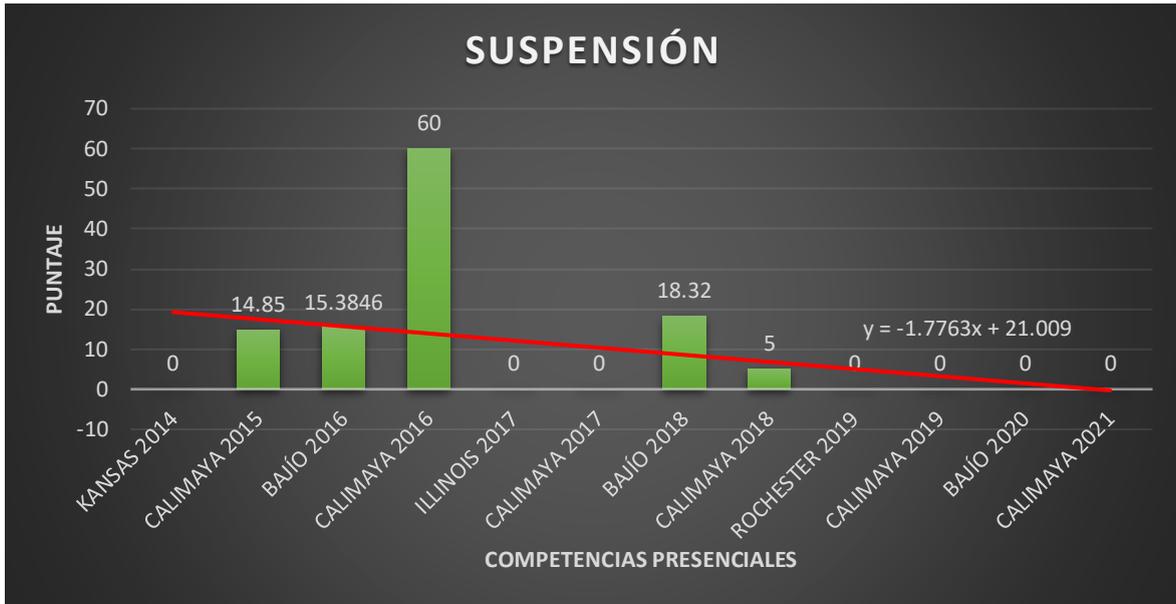
- **Objetivo 2:** Obtener mínimo o superar el puntaje obtenido en la prueba de **Rocas** en la competencia presencial anterior (Calimaya 2019) de 13

- **Resultado Objetivo 2:** Puntaje no obtenido debido a que, por razones de los jueces, esta prueba no se realizó; Objetivo inconcluso



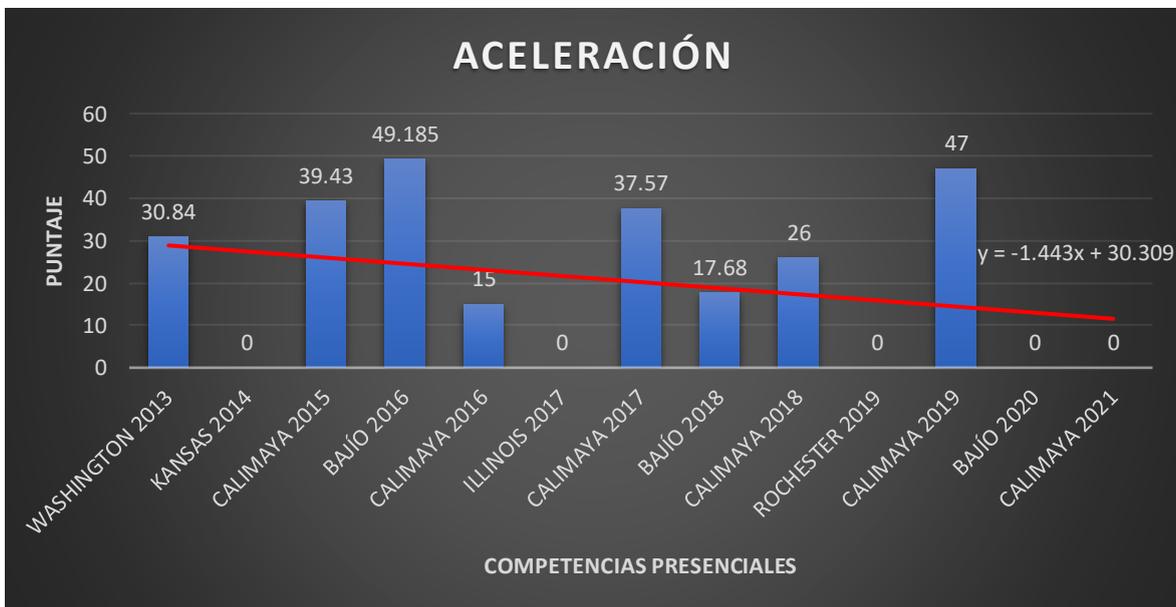
**Figura 1.2** - Puntajes de la Prueba de *Rocas* desde Washington 2013 hasta México 2019

A pesar de que no se realizó la prueba de rocas en la competencia, el vehículo se probó en el parque “Las Maravillas”, donde tuvo problemas para pasar zonas rocosas debido a la baja altura ocasionada por el alto peso que tuvo el vehículo. Otro ejemplo de esto, es la prueba de suspensión, funciona como símil con la prueba de rocas, en el aspecto de que el vehículo debe superar terreno muy irregular, y en dicha prueba, el vehículo se quedó atorado de nuevo, por su baja altura. Los resultados de la prueba de suspensión fueron:



**Figura 1.3 - Puntajes de la Prueba de *Suspensión* desde Kansas 2014 hasta México 2021**

Además, se notó un decremento en el desempeño del vehículo con respecto al RWD teniendo que, de las 5 pruebas dinámicas que se realizaron en total en la competencia, el 60% de ellas (aceleración, suspensión y pendiente) mostraron un decremento o se mantuvieron en el puntaje mínimo de 0:



**Figura 1.4 – Puntajes de la Prueba de *Aceleración* desde Washington 2013 hasta México 2021**

El 40% de las pruebas que si mostraron un mejor desempeño, fueron:

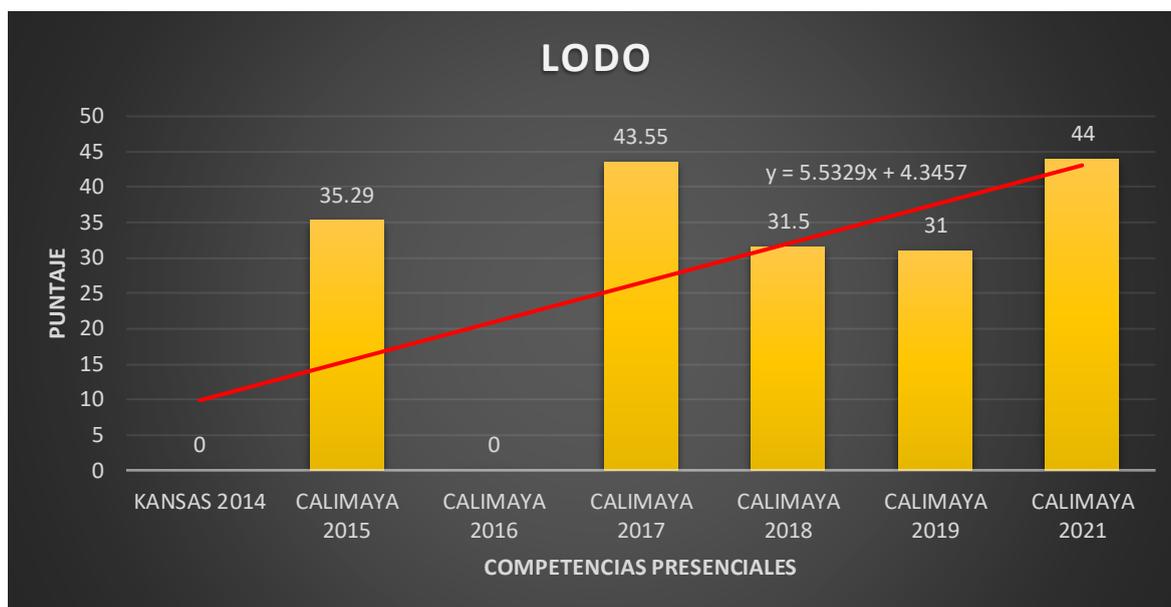


Figura 1.5 - Puntajes de la Prueba de *Lodo* desde Kansas 2014 hasta México 2021

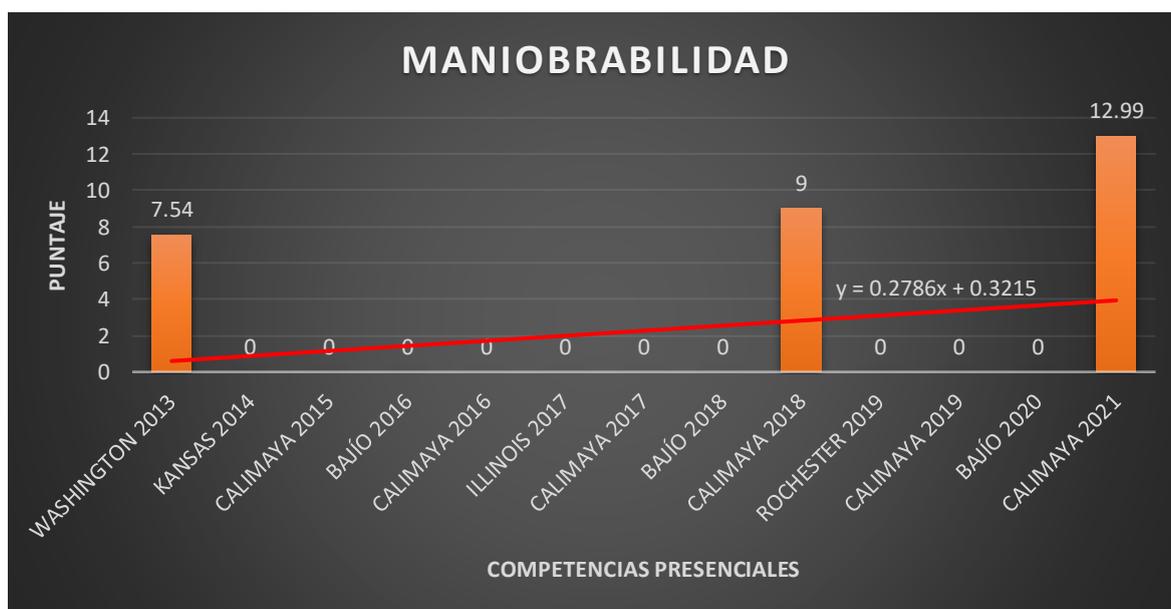


Figura 1.6 - Puntajes de la Prueba de *Maniobrabilidad* desde Washington 2013 hasta México 2021

Tras un análisis Causa-Raíz, se llegó a la conclusión de que la causa radicaba en el incremento de masa estructural en muchos de los componentes, como se muestra a continuación:<sup>1</sup>

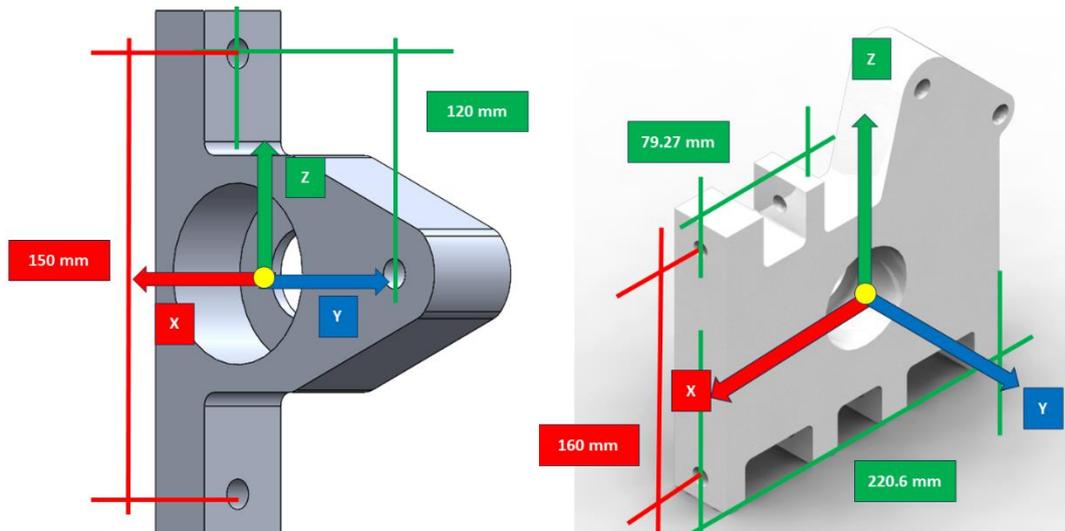
Componente	Delta Peso Unitario	Delta Peso Total	% Incremento Unitario
Guarda de Tren Motriz	80 [g] a 3 [Kg] *1 Guarda		275%
Chasis	32.38 [Kg] a 70 [Kg] *1 Chasis		116.18%
<i>Knuckle</i> Trasero	2.49 [Kg] a 3.9 [Kg]	4.98 [Kg] a 7.8 [Kg] *2 Knuckles	56.62%
<i>Knuckle</i> Delantero	3.57 [Kg] a 4.727 [Kg]	7.14 [Kg] a 9.545 [Kg] *2 Knuckles	32.40%
Maza Delantera	2.92 [Kg] a 3.565 [Kg]	5.84 [Kg] a 7.13 [Kg] *2 Mazas	22%
Maza Trasera	2.82 [Kg] a 3.309 [Kg]	5.64 [Kg] a 6.618 [Kg] *2 Mazas	17%

**Tabla 1.1** – Componentes que aumentaron peso en el vehículo 4WD de México 2021

Se pueden observar incrementos de peso desde un 17%, hasta casi 3 veces el peso original. Si bien la Guarda tuvo la particularidad de que hubo problemas con los proveedores por lo que se tuvo que modificar el material de último momento a lo que el proveedor tuviera disponible, todos los componentes tuvieron dos impactos principales:

- a) El equipo seleccionó como pruebas objetivo **Pendiente** y **Rocas** (explicadas posteriormente en el documento), las cuales requieren vehículos pesados para mejorar tracción y resistencia estructural
- b) Debido a que fue el primer vehículo 4WD diseñado por el equipo, la falta de experiencia en este tipo de vehículos se tradujo en imponer Factores de Seguridad al realizar los análisis de los componentes estructurales (como los *Knuckles*, Mazas y Chasis) igual o mayor a 2.0 en todos o la mayoría de Casos Críticos.

Además, los *Knuckles* tienen la particularidad de tener una diferencia del 20% en el incremento de peso entre traseros y delanteros debido a que los traseros se vieron afectados por el cambio de Suspensión Trasera de un Brazo Semi-Arrastrado a un Brazo tipo H, lo cual obliga al *Knuckle* a diseñarse de mayor tamaño para poder sujetarse correctamente de la suspensión. Esta comparación se observa en la siguiente figura:



**Figura 1.7** – Comparación de dimensiones y puntos de anclaje entre *Knuckle* Trasero México 2020 y el México 2021

Debido a que los *Knuckles* son los componentes con los que mayor experiencia y documentación se cuenta para diseñar (de los componentes mencionados en la **Tabla 1.1**), se les reducirá el peso mediante alguna de las siguientes líneas de trabajo:

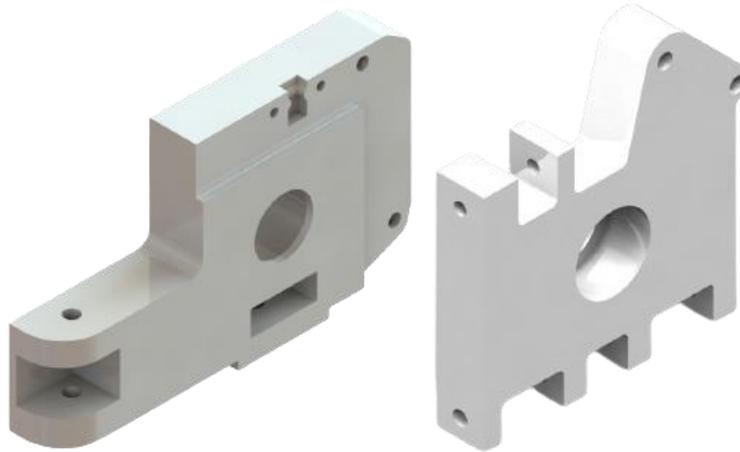
Propuesta de Reducción de Peso	Descripción
Optimización Topológica	Buscar maximizar la resistencia del componente minimizando su masa
Cambio de Material	Buscar materiales con menor densidad para reducir el peso del componente

**Tabla 1.2** – Propuestas de reducción de peso

De las cuales, debido a que ya se usa un Aluminio para ambos *Knuckles* (el cual es un metal de “baja densidad” en comparación con Acero, por ejemplo), se optará por la **Optimización Topológica** como solución a este problema.<sup>23,4,5,6,7</sup>

## I.I. II. ¿Qué es un *Knuckle*?

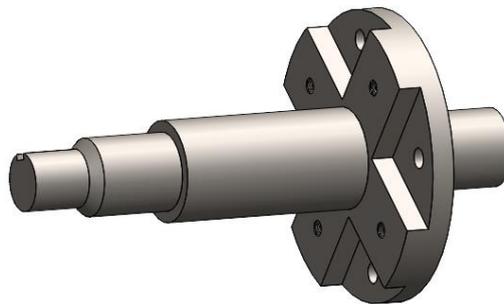
***Knuckle***: Es un componente estructural cuya función principal es la de soportar el vehículo resistiendo las fuerzas que entran tanto del lado del chasis, como del lado del terreno.<sup>1,3,8,9</sup>



**Figura 1.8** - *Knuckle* Delantero Derecho a la Izquierda y *Knuckle* Trasero Derecho a la Derecha, ambos proporcionados por el equipo de Baja SAE® UNAM

Componentes con interferencias (que conectan) al *Knuckle*:

**Maza:** Encargado del correcto giro de la llanta y, en caso de haber una flecha, la correcta transmisión de la potencia a la llanta mediante algún elemento como estriado o cuñas. <sup>1,3,8,9</sup>



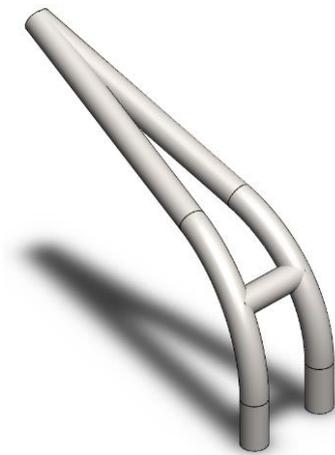
**Figura 1.9** - Maza Delantera (tanto Izquierda como Derecha) proporcionada por el equipo de Baja SAE® UNAM

**Doble Brazo “A”:** Consiste en dos horquillas en forma de A o “*Wishbone*”, una conectada a la parte superior del *Knuckle*, y el otro en la parte inferior del mismo. El amortiguador conecta a alguna de las dos horquillas (usualmente la inferior).<sup>10,11,12</sup>



**Figura 1.10** - Horquilla Tipo A Inferior con soporte para Amortiguador proporcionada por el equipo de Baja SAE® UNAM

**Brazo Semi Arrastrado:** Consiste en un brazo cuya principal característica es que conecta en un solo punto al chasis, y cuenta con una inclinación por lo cual no se encuentra de manera paralela al plano intermedio (desde una vista lateral) del vehículo. Esto cuenta con el beneficio, por un lado, de permitir que el brazo aleje o acerque la llanta al chasis la distancia requerida, y por el otro, que se modifique el camber como se necesite, fijando dicha posición mediante el uso de uno o dos brazos seguidores.



**Figura 1.11** - Semi-Trailing Arm proporcionada por el equipo de Baja SAE® UNAM

**Brazo H:** Es una suspensión que tiene dos puntos de sujeción con el *Knuckle* y dos puntos de sujeción con el chasis (cada punto del *Knuckle* conecta con un punto del chasis mediante una barra) y un elemento que conecta ambas barras generando, de esta manera, una forma de H.<sup>10,11,12</sup>



**Figura 1.12** - Brazo H proporcionada por el equipo de Baja SAE® UNAM

**Brazo Seguidor:** Elemento rígido que conecta el chasis al *Knuckle* el cual permite, no sólo ajustar el ángulo *camber* de la llanta, sino, además, asegurar el correcto seguimiento del *Knuckle* a la curva generada por la suspensión.<sup>10,11,12</sup>



**Figura 1.13** - Brazo Seguidor proporcionada por el equipo de Baja SAE® UNAM

## ***I. II. Baja SAE®***

### ***I.II. I. SAE®***

Conocida en español como la *Sociedad de Ingenieros Automotrices*, la *SAE International®* es una organización cuyo objetivo es el de coordinar y planificar diferentes competencias para poner a prueba el ingenio y conocimientos de estudiantes de diferentes universidades en muchas partes del mundo como la India, Canadá, Brasil, México, entre otros.

Algunas de las competencias desarrolladas por la SAE® incluyen:

- ✓ *Formula SAE®* – Se diseña y manufactura un prototipo de vehículo tipo *Formula*
- ✓ *Baja SAE®* – Se diseña y manufactura un vehículo todoterreno

- ✓ eBaja SAE® – Se diseña y manufactura un vehículo todoterreno eléctrico

Además, trabaja en publicaciones de artículos y libros, así como la organización de conferencias mediante el apoyo de ingenieros, y fomentando el desarrollo de investigaciones para la mejora de los diseños de los vehículos.<sup>13</sup>

## *I.II. II. Baja SAE®*

Consiste en el diseño y manufactura de un vehículo monoplaza todoterreno, el cual debe pasar una serie de pruebas para determinar la resistencia, velocidad y comodidad de los vehículos diseñados por las diversas universidades. Estas competencias se ubicarán en países de diferentes continentes:

1. Estados Unidos de América
2. Canadá
3. México
4. Brasil
5. Corea del Norte
6. Sudáfrica

Por lo cual, los aspectos ambientales (climas, terrenos, etc.), son importantes a tomar en cuenta a la hora de realizar el diseño del vehículo dependiendo de las competencias a las que se quiera asistir. La competencia se divide en 3 días principales:<sup>13</sup>

### I.II.II. I. Tech Inspection y Pruebas

#### Estáticas

En este día, se realiza lo que se conoce como **Tech Inspection (Inspección Técnica)** en el cual los jueces de la competencia verifican que el vehículo cumpla con todas las especificaciones y normas establecidas en el Reglamento de la SAE®, incluyendo las consideraciones particulares del país donde se lleva a cabo la competencia. Una vez que se pasa la **Inspección Técnica**, el equipo pasa a la prueba de **Frenado**, en la cual el vehículo debe acelerar a máxima velocidad y luego frenar en una sección delimitada por 4 jueces, quienes verifican que las 4 llantas amarran al mismo tiempo a la hora de frenar.

Al mismo tiempo, se realizan las **Pruebas Estáticas**, las cuales consisten en:

1. **Diseño:** Cada equipo presenta el proceso de diseño de sus componentes, mostrando qué decisiones se tomaron, y por qué se tomaron, para definir ese diseño en específico.
2. **Ventas:** Partiendo de la suposición de que el equipo representa una empresa cuyo objetivo es producir el vehículo en masa, se debe plantear el escenario de producción de la empresa, así como el objetivo para el cual se aplicará el vehículo y, por lo tanto, quienes serían sus probables compradores/ clientes.
3. **Costos y Reducción de Costos:** Consiste en calcular el costo del vehículo, desde materia prima, hasta los detalles finales de las piezas, como realizar una cuerda o un rectificador, y, basado en estos datos, realizar propuestas para reducir el costo del vehículo en futuros diseños.<sup>13</sup>

## I.II.II. II. Pruebas Dinámicas

El segundo día se realizan las **pruebas dinámicas**, entre las cuales están:

1. **Aceleración:** El vehículo debe recorrer una pista en línea recta, con una distancia establecida por los organizadores, en el menor tiempo posible
2. **Pendiente:** El vehículo debe subir una pendiente, a un ángulo seleccionado por los jueces, en el menor tiempo posible
3. **Lodo:** Consiste en pasar una recta llena de lodo, sin que el vehículo se atore, en el menor tiempo posible
4. **Rocas:** El vehículo debe resistir un tramo de pista con rocas afiladas y amontonadas para cruzar en el menor tiempo posible
5. **Maniobrabilidad:** Se deben esquivar elementos y dar vueltas cerradas en una pista en el menor tiempo posible
6. **Suspensión:** El vehículo debe poder sobrepasar una pista con terreno muy irregular sin atorarse ni fracturarse en el menor tiempo posible
7. **Arrastre:** El vehículo se amarra a una camioneta de 1 tonelada, y debe jalarlo por una pista recta en el menor tiempo posible<sup>13</sup>

### I.II.II. III. Endurance

El **Endurance** es una carrera cuya pista está constituida por diferentes elementos de las pruebas dinámicas (o sea que hay una sección con rocas, una sección con lodo, una sección con una pendiente a subir, etc.). Es la prueba con mayor puntuación, y tiene el objetivo de que el vehículo de el mayor número de vueltas posibles en 4 horas, y, en caso de tener una falla (que algún componente se rompa, por ejemplo), el vehículo debe ser llevado a *pits* para ser reparado, y que pueda seguir compitiendo.<sup>13</sup>

### *I.II. III. Baja SAE® UNAM*

Equipo de la Facultad de Ingeniería con un histórico de 1992 a 2012 y retomado en 2015 el cual se subdivide en 7 sistemas: *Capitanía, Administración, Tren Motriz, Suspensión y Dirección, Chasis, Ergonomía y Estética, Instrumentación y Adquisición de Datos y Masas No Suspendidas*, cada uno enfocado en diferentes secciones y procesos del vehículo. El *Knuckle* en particular, es diseñado por el Sistema de *Masas No Suspendidas*.

Si bien cada sistema se encarga de diseñar sus propios componentes, el equipo cuenta con una metodología de diseño única para todos los sistemas, la cual consiste en las siguientes etapas: **Diseño Conceptual, Diseño Paramétrico, Diseño a Detalle, Manufactura, Pruebas y Competencia**. En caso de realizar la optimización topológica durante el rediseño del *Knuckle* (o de cualquier componente), se debe incluir en la etapa de **Diseño Paramétrico**, así como se observa en la imagen:

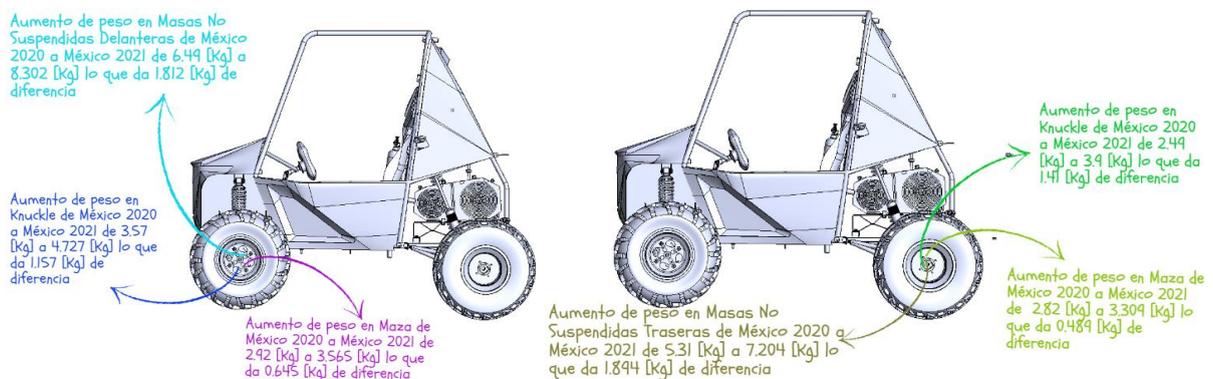


**Figura 1.14** - Ciclo iterativo de diseño planteado para la reducción de peso de los *Knuckles*

La **Figura 1.14** representa la metodología de diseño a llevar a cabo para esta tesis.

## I. III. Objetivos y Alcances

Debido a que el vehículo diseñado para México 2020 fue el primer vehículo en quedar en primer lugar general de una competencia de Baja SAE® UNAM, esta competencia será la referencia para mejorar. En la imagen se documentan las variaciones de peso entre México 2020, y México 2021 tanto de los *Knuckles*, como del peso a nivel sistema (Masas No Suspensas):



**Figuras 1.15** – Aumento de peso de *Knuckles* y del Sistema de Masas No Suspendidas (imagen del vehículo proporcionada por el equipo de Baja SAE® UNAM)

Por lo tanto, el requerimiento de reducción de peso será:

- *Reducir en, mínimo, 1.812 [Kg] el peso del Knuckle delantero*, donde dichos [Kg] representan lo que aumentó el sistema en la región delantera (por lado), de los 6.49 [Kg] que pesaba anteriormente
- *Reducir en, mínimo, 1.894 [Kg] el peso del Knuckle trasero*, donde dichos [Kg] representan lo que aumentó el sistema en la región trasera (por lado), de los 5.31 [Kg] que pesaba anteriormente

Además, es importante resaltar que debemos verificar tanto que el nuevo componente no falle al ser usado, como que pueda ser manufacturado. Esto se evaluará mediante:<sup>14,15,16,17</sup>

- a) Esfuerzo inducido al material no exceda los límites admisibles del material
- b) Lista de pasos para verificar que los *knuckles* finales son manufacturables

Como alcances de la tesis, delimitaremos este documento a los siguientes puntos:

- a) El análisis sólo abarcará al *Knuckle*, no a otros componentes
- b) Si bien se buscará que el componente final sea manufacturable, no se entrará a detalles sobre su proceso de manufactura
- c) En caso de que el vehículo no se encuentre disponible para las pruebas requeridas, se acudirá a un proceso similar que proporcione resultados para mostrar cómo debe ser el proceso de reducción de peso de los *Knuckles*
- d) Debido a que el proceso de modificación del *Knuckle* y su validación estructural es un proceso cíclico iterativo (como se observa en la **Figura 1.14**), y dicho tipo de procesos puede ser realizado de manera infinita o por mucho tiempo, se delimitará el proceso iterativo a cualquiera de las siguientes dos restricciones que se cumpla primero:
  - a. Si el componente **se reduce mínimo** en el peso objetivo **y** todos los análisis estáticos cumplen con el Factor de Seguridad impuesto mínimo de 1.5 **y** el análisis de Fatiga cumple con el Factor de Seguridad impuesto mínimo de 1.0, el proceso iterativo se da por terminado.
  - b. Si cualquiera de los tres objetivos antes mencionados (peso final del componente, Factor de Seguridad para análisis estáticos o Factor de Seguridad para análisis de Fatiga) **no se cumple**, se realizará el proceso iterativo **máximo 5 veces** buscando, en el caso del peso y el Factor de Seguridad de Fatiga, acercarse lo más posible al valor del objetivo planteado, y en el caso del Factor de Seguridad Estático, buscar un Factor de Seguridad mínimo de 1.3.

### I.III. I. Valores Objetivo para Validaciones del Componente

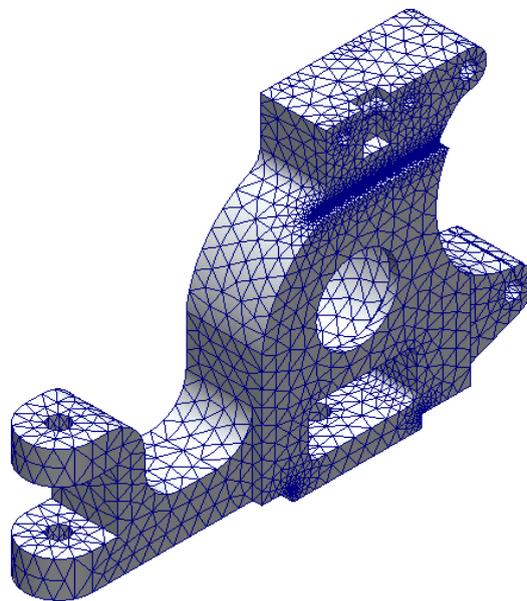
Objetivo	<i>Knuckle</i> Delantero	<i>Knuckle</i> Trasero
Reducir el Peso de los <i>Knuckles</i>	Mínimo 1.812 [Kg] (que pese menos de 2.915 [Kg])	Mínimo 1.894 [Kg] (que pese menos de 2.006 [Kg])
Factor de Seguridad Mínimo en Análisis Estáticos	1.5	1.5
Factor de Seguridad Mínimo en Análisis de Fatiga	1.0 ( <i>Vida Infinita</i> )	1.0 ( <i>Vida Infinita</i> )
<i>Knuckle</i> Manufacturable	Lista de pasos generales de Manufactura	Lista de pasos generales de Manufactura

**Tabla 1.3** - Resumen de Objetivos y Requerimientos de la Tesis

# Capítulo II. Antecedentes

## II. I. Método de Elementos Finitos

El método por Elementos Finitos es una manera computarizada mediante la cual un elemento sólido de geometría compleja (ya sea un cuerpo o una estructura), es dividido en muchos elementos de menor tamaño (usualmente cubos), llamados elementos finitos, para predecir el comportamiento de dicho cuerpo ante sollicitaciones externas, ya sean fuerzas, vibraciones, cambios de temperatura, entre otros. Este proceso de división se le conoce como mallado, y se ve así como se observa en la **Figura 2.1.**<sup>18</sup>



**Figura 2.1 – Knuckle Delantero con Malla**

La manera en que se predice dicho comportamiento, es que, dependiendo del tipo de análisis deseado (estático, dinámico, de fatiga, etc.), las entradas al análisis (fuerzas, momentos, etc.) y los grados de libertad de cada nodo, el programa genera una matriz de rigidez por elemento para analizar la relación entre las fuerzas aplicadas a cada nodo con su desplazamiento. Luego, suma cada una de estas matrices de rigidez para obtener una matriz global y resuelve este sistema de ecuaciones, obteniendo el desplazamiento de cada nodo. Una vez que se tiene esto, se usan las ecuaciones constitutivas del material usado para calcular los esfuerzos.<sup>18</sup>

En el caso específico de esta tesis, se cuenta con un material isotrópico (Aluminio 6061 T6, o Aceros 4041, 1020, ó 1045) en 3 dimensiones, para lo cual, la relación entre esfuerzos  $\sigma$  y deformaciones  $\epsilon$  se puede expresar mediante el tensor de rigidez elástica  $\mathbf{C}$ , el cual, a su vez, está en función del módulo de elasticidad del material  $\mathbf{E}$ , y el coeficiente de Poisson  $\nu$ :<sup>19,20,21,22</sup>

$$\sigma = \mathbf{C}\epsilon \quad (2.1)$$

Donde:

$$\mathbf{C} = \frac{\mathbf{E}}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Si bien es cierto que estos análisis por Elementos Finitos son una buena predicción del comportamiento del componente y, por lo tanto, un buen método como toma de decisiones de Diseño, sigue siendo una aproximación, por lo cual, habrá ciertas características del Análisis por Elemento Finito que afectarán en los resultados. Los dos que nos interesan son:

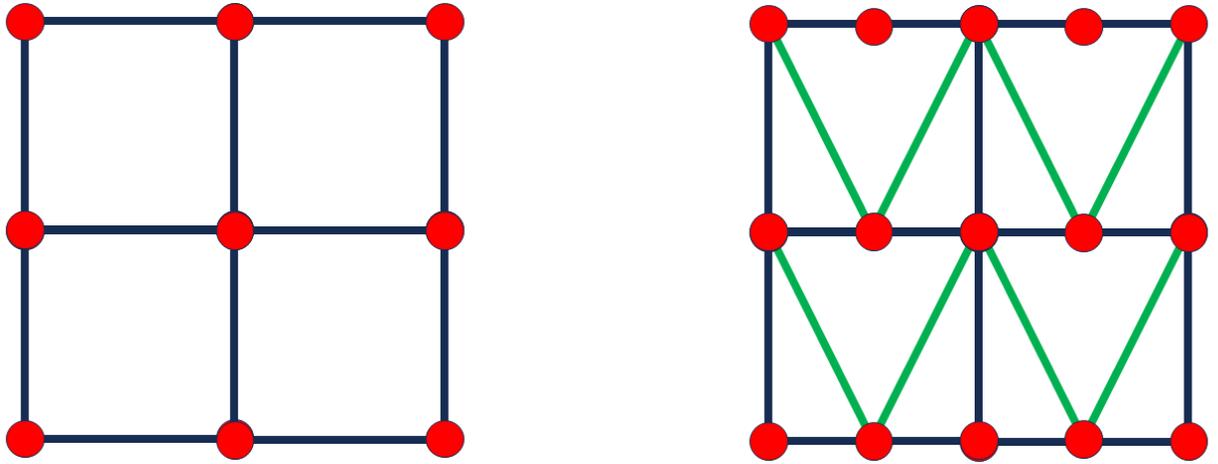
- Tamaño promedio de Malla
- Geometría de Mallado

El primero se refiere a qué tan grandes o pequeños serán, en promedio, los elementos finitos en los que se dividirá el sólido a analizar, ya que entre más pequeños sean dichos elementos finitos, mayor cantidad de ellos habrá al dividir el sólido a analizar, lo cual resulta en mayor cantidad de nodos y, a su vez, en mayor cantidad de ecuaciones por lo que el tiempo de computación del análisis irá aumentando más y más.

El segundo se refiere a la geometría que tomarán dichos elementos finitos. En términos de los softwares, para esta opción suele haber 3 opciones:

- Quads (Cubos)
- Trias (Pirámides triangulares)
- Mixto (la geometría mezcla el uso de Quads y Trias, y, dependiendo de la geometría, los acomoda de la mejor manera posible)

La importancia de la geometría, viene principalmente, y al igual que en punto anterior, en el número de nodos, puesto que un cuadrado viene compuesto de 2 triángulos, entonces con una malla tipo *Tría*, se tendrían mayor cantidad de nodos. La comparación entre ambas geometrías se vería como en la **Figura 2.2**:



**Figura 2.2** – Comparación entre Malla tipo *Quads* (izquierda) y tipo *Trias* (derecha)

## II. II. Análisis Modal

También llamado Análisis de Modos de Vibración, es un análisis cuyo objetivo es estudiar el comportamiento dinámico de un determinado componente, mediante la obtención de las frecuencias naturales de vibración del componente en cada una de las direcciones principales (X, Y ó Z).

Para la obtención de dichas frecuencias naturales, el software requiere, en primera instancia, de un proceso de Mallado que corresponde a la división del componente a analizar en elementos finitos. Como segundo paso, el análisis requiere de la colocación de las restricciones que tendrá el componente, ya que el hecho de que ciertos nodos tengan limitaciones en sus grados de libertad, afectará a cómo el componente reacciona a las diversas frecuencias. <sup>19,23,24,25,26</sup>

Respecto al análisis, debido a que la vibración es una situación de movimiento del sistema, se partirá de la ecuación del movimiento de un sistema de múltiples grados de libertad, para lo cual se tiene: <sup>19,27,28</sup>

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (2.3)$$

Donde:

$\mathbf{M}$  = Matriz de masa

$C =$  Matriz de amortiguamiento

$K =$  Matriz de rigidez

$u(t) =$  Vector de desplazamientos

$\dot{u}(t) =$  Vector de velocidades

$\ddot{u}(t) =$  Vector de aceleraciones

$F(t) =$  Vector de Fuerzas

Sin embargo, debido a que el análisis modal se enfoca en caracterizar las propiedades dinámicas intrínsecas al sistema, entonces se asume que la matriz de amortiguamiento  $C$  equivale a 0, y que las interferencias o excitaciones externas son nulas, por lo cual el vector de fuerzas  $F(t)$  también equivale a 0. Por lo tanto, nos queda: <sup>19, 27,28</sup>

$$M\ddot{u}(t) + Ku(t) = \mathbf{0} \quad (2.4)$$

Una vez se tenga la ecuación 2.4, se procede a asumir una solución a la ecuación tal que:

$$u(t) = \phi e^{i\omega t} \quad (2.5)$$

Donde:

$\phi =$  Amplitud de la vibración

$\omega =$  Frecuencia de la vibración

La forma que tiene la solución propuesta ( $\phi e^{i\omega t}$ ) es debido a que incluye tanto componentes de seno, como de coseno al ser desarrollada mediante la fórmula de Euler, los cuales son esenciales para resolver ecuaciones de segundo grado en sistemas vibratorios: <sup>19, 27,28</sup>

$$e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i\sin(\omega t) \quad (2.6)$$

Sustituyendo la ecuación 2.5 en la 2.4, y desarrollando, queda que para obtener los eigenvalores (las frecuencias naturales del componente) y los eigenvectores (direcciones en las cuales el componente puede entrar en resonancia) se obtienen: <sup>19, 27,28</sup>

1. Obtener el determinante de  $\det(K - \lambda M) = 0$  (2.7)
2. Resolver las ecuaciones para  $\omega_i = \sqrt{\lambda_i}$  (2.8)
3. Sustituir  $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_i$  en  $(K - \lambda_i M)\phi_i = \mathbf{0}$  (2.9), para obtener  $\phi_1, \phi_2 \dots \phi_i$

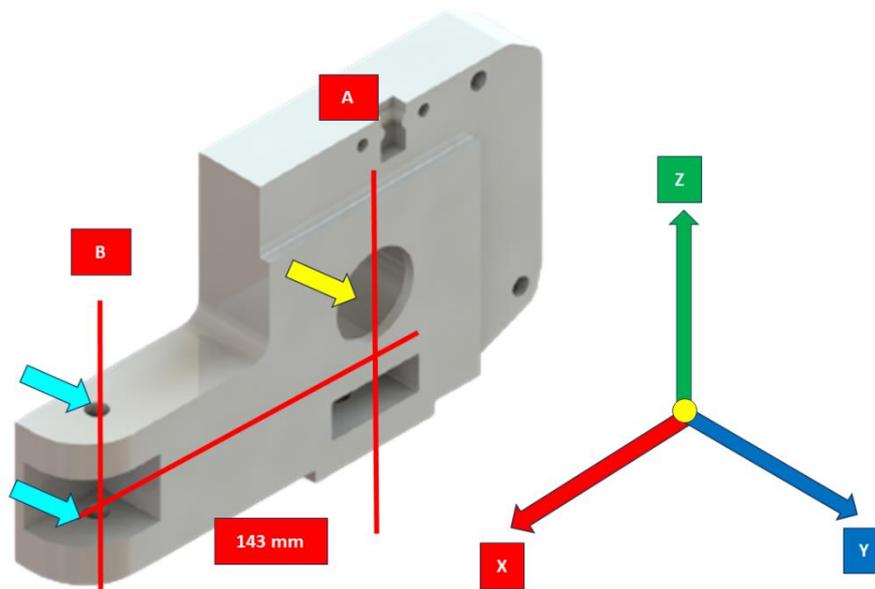
Y finalmente normalizar, de ser necesario, los eigenvectores. <sup>19, 27,28</sup>

## II. III. Optimización Estructural

La optimización estructural es una rama de la ingeniería y el diseño, en la cual se busca obtener la forma “perfecta” de un componente cualquiera, en función de sus restricciones y objetivos. Ya sea que se busque un elemento que no tenga ningún tipo de pérdidas energéticas, o que tenga resistencia infinita por muchos años, pero siendo increíblemente ligera, la optimización estructural hace uso de algoritmos y ecuaciones programadas para ser iteradas, hasta obtener un componente lo más aproximado a estas idealizaciones. Debido a que es imposible obtener todas estas características idealizadas en un solo análisis, la optimización estructural se divide en 3 grandes ramas dependiendo del enfoque o la característica del elemento a analizar que es prioritaria o que se busca optimizar (parámetros, geometría o topología), las cuales son:<sup>29,30,31</sup>

### II.III. I. Optimización Paramétrica

Se conoce como optimización paramétrica, al proceso iterativo computacional de, con una geometría y topología base (componente definido), buscar la mejor configuración de los parámetros de dicho componente en función de las cargas o situaciones a las que se encuentra sometido. Ejemplo usando el *Knuckle* delantero:<sup>32,33,34</sup>



**Figura 2.3** – Ejemplo de optimización paramétrica con *Knuckle* delantero

El barreno señalado con **flecha azul**, corresponde al punto de sujeción entre el *Knuckle*, y la bieleta de la dirección. El barreno señalado con **flecha amarilla**, corresponde al lugar donde el rodamiento para que gire la llanta se encuentra ubicado.

El parámetro de interés es la distancia en nuestro eje X entre la línea A y la línea B, que pasan por los centros de sus respectivos barrenos.<sup>32,33,34</sup>

Lo que sucede aquí en resumen (se verá más a fondo en partes posteriores del documento), es que la línea B conecta con la dirección, por lo que se empuja y jala para darle orientación al vehículo. Dicha línea B, rota con respecto a la línea A, por lo cual, si se aumenta mucho esa distancia, el par al jalar o empujar el *Knuckle* aumenta y, por lo tanto, los esfuerzos que sufre el *Knuckle* aumentan. Por otro lado, si la distancia es muy pequeña, será muy complicado para el piloto poder girar el vehículo. Una optimización paramétrica indicaría la distancia óptima en función de estas dos restricciones.<sup>32,33,34</sup>

### *II.III. II. Optimización de Forma*

Se le llama así, al proceso computacional mediante el cual se analiza y modifica la estructura externa (la geometría) de un componente o elemento sin alterar su topología básica, buscando mejorar alguna propiedad de dicha geometría, como su resistencia o aerodinámica. Suele usarse para buscar la mejora de perfiles aerodinámicos, estructuras arquitectónicas o incluso carcasas de dispositivos.<sup>35,36,37</sup>

### *II.III. III. Optimización Topológica*

Se le conoce como Optimización Topológica, al proceso por Elementos Finitos en el cual se maximizan características específicas de un componente, y se minimizan otras en función de las cargas o situaciones a las que se encuentra sometido. Usualmente, este análisis se enfoca en minimizar la masa de dicho elemento bajo estudio, al mismo tiempo que se mantiene la rigidez necesaria para tener un Factor de Seguridad mínimo en dicho componente.<sup>32,34,38,39,40,4,30</sup>

Resumiendo los 3 tipos de optimización estructural antes explicados, tenemos:

Tipos de Optimización	Optimización Paramétrica	Optimización de Forma	Optimización Topológica
Objetivo de uso	Mejora la configuración de parámetros de un componente sin modificar geometría ni topología	Mejora la configuración de la geometría de un componente sin modificar topología	Modifica la topología de un componente realizando redistribución del material

Tabla 2.1 – Tipos de Optimización Estructural

Debido a que el enfoque de la tesis es reducir el peso al *Knuckle*, entonces se buscará la redistribución del material intentando mantener la resistencia del mismo, por lo cual se realizará una optimización topológica. Para lograr esto, se cuenta con ciertos conceptos clave explicados a continuación: <sup>32,34,38,39,40,30</sup>

1. **Función Objetivo:** Es aquella ecuación que define qué objetivo se tiene del análisis. En el caso de esta tesis, es minimizar el peso. Una forma general de expresarla es como:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (2.10)$$

Donde **f(x)** es nuestra **Función Objetivo**, **w** es el peso del elemento **i**, y **x** es la variable de diseño del elemento **i**, siendo un ejemplo, en este caso, el espesor del *Knuckle*.

2. **Restricciones de Equilibrio:** Se plantean como una afirmación a que el elemento de análisis se encuentra en equilibrio con las cargas que sufre. En otras palabras, la suma de cargas es igual a 0:

$$K(x)u = F \quad (2.11)$$

Donde **K(x)** es la matriz de rigidez dependiente de las variables de diseño, y **u** el vector de desplazamientos. **F** es el vector de fuerzas aplicadas al componente.

3. **Restricciones de Tensiones y Deformaciones:** Garantizan que las Tensiones y Deformaciones no excedan límites permitidos. Como ejemplo, en el caso de esta tesis,

el software utilizado pide un valor de factor de seguridad mínimo como restricción. Esto se expresa como:

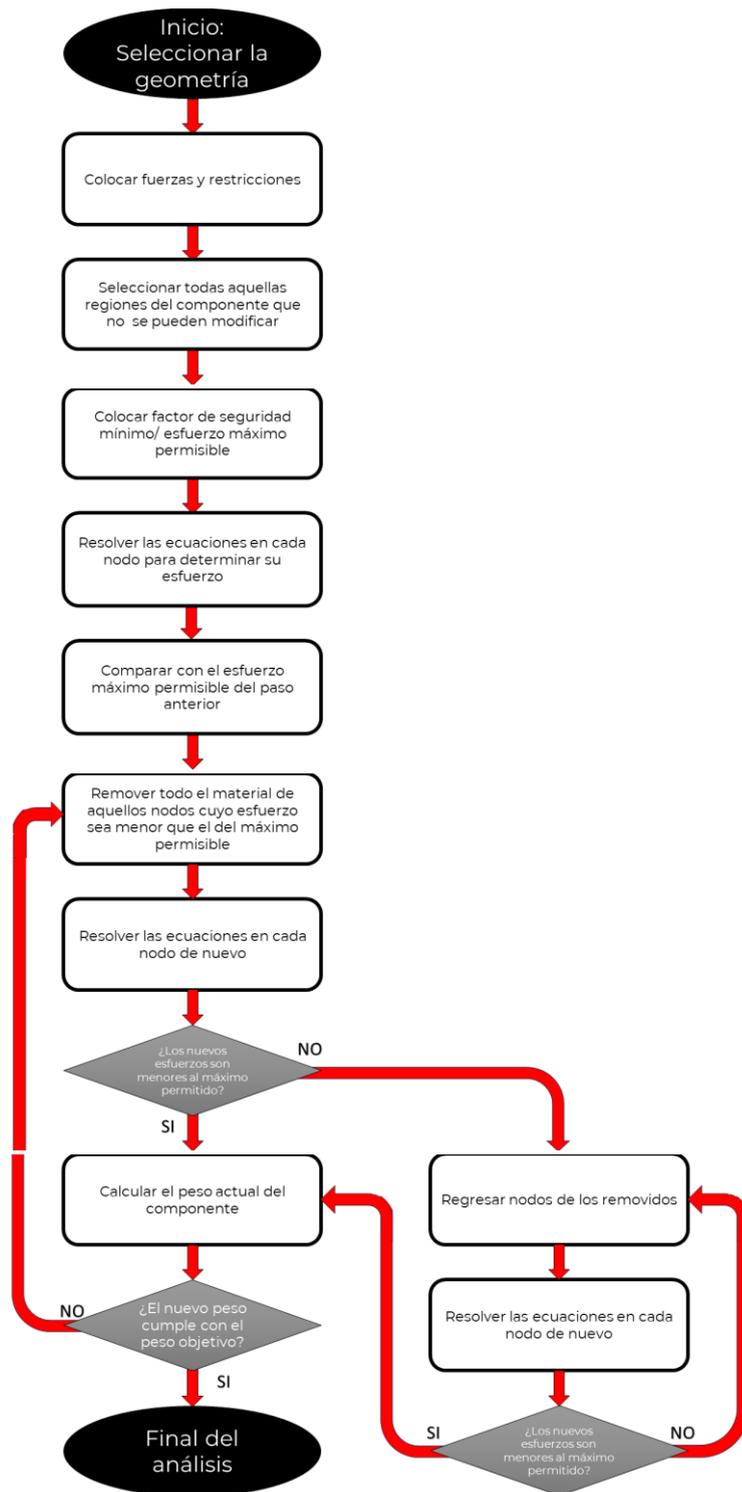
$$\sigma_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq \sigma_{m\acute{a}x} \quad (2.5), \quad \varepsilon_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq \varepsilon_{m\acute{a}x} \quad (2.12)$$

Donde  $\mathbf{x}$  representa nuestra variable de dise˜no, y  $\mathbf{u}$  representa los desplazamientos.

4. **Restricciones de Geometría:** Se limitan las dimensiones de las variables de dise˜no para que se cumpla con requisitos específicos. Ejemplo de esto en el *Knuckle*, fueron todos los barrenos que funcionan como interfaces con otros componentes (barrenos para la Horquilla Superior, barrenos para el Cáliper, Barreno para el Rodamiento, entre otros.), dichos barrenos debían permanecer intactos tras la optimización tanto en diámetro, cómo longitud.

$$x_{min} < x_i < x_{m\acute{a}x} \quad (2.13)$$

Como se ha mencionado anteriormente, todos estos procesos de optimizaciones vienen de algoritmos y ecuaciones programadas para funcionar de manera iterativa, hasta cumplir con los objetivos deseados. Si bien todas estas ecuaciones y algoritmos no se desarrollarán en la tesis debido a que no se cuestiona el funcionamiento de los mismos, simplemente se utilizan, en la **Figura 2.4** se observa un diagrama de flujo de cómo funcionan dichos softwares:<sup>41</sup>



**Figura 2.4 – Diagrama de flujo del proceso de funcionamiento de una optimización topológica**

## *II. IV. Fatiga y criterios de vida infinita*

Se le conoce como Fatiga, al constante desgaste o deterioro de un material debido a cargas cíclicas o variables. Dependiendo de la geometría del material y las zonas de aplicación de las cargas, zonas específicas de la geometría se desgastarán hasta llegar al punto de ruptura después de un determinado número de ciclos.

En términos de software, el análisis de fatiga utiliza el método de elementos finitos, en cuyos nodos se aplican entradas como aceleraciones o Fuerzas en función del tiempo, resultando en Esfuerzos Máximos y Mínimos a lo largo del tiempo, los cuales deben ser posteriormente analizados con algún criterio de vida infinita para poder determinar un factor de seguridad. Dicho criterio debe ser seleccionado según el caso al que aplique: <sup>16,17,42,43,44,45</sup>

### *II.IV. I. Fatiga Completamente Reversible*

Se le conoce así, cuando la señal que representa la vibración a la que se somete el componente es totalmente simétrica, con un Esfuerzo Promedio igual a 0. Para este caso particular, se usa el Criterio de Manson-Coffin. Debido a que este tipo de señal no se encuentra en ningún terreno real (las aceleraciones del terreno son totalmente aleatorias dependiendo de la rugosidad superficial y elementos que se encuentren en el mismo), entonces no se profundizará en este subtema. El enfoque se hará en el siguiente subtema: **II.IV. II. Fatiga Fluctuante/ Variable**, al ser lo requerido para este trabajo.<sup>42,46</sup>

### *II.IV. II. Fatiga Fluctuante/ Variable*

Se le conoce así, cuando la señal que representa la vibración a la que se somete el componente es asimétrica, con un Esfuerzo Promedio diferente a 0. Para poder analizar este tipo de señales, se cuentan con diversos criterios, cuyas ecuaciones se expresan a continuación:<sup>42,46</sup>

1. Criterio de Soderberg

$$\frac{S}{S_e} + \frac{S_m}{S_y} \leq \frac{1}{n} \quad (2.14)$$

**Ecuación 2.8** – Criterio de Soderberg

Donde:

$S$  = Amplitud Nominal (de cresta a cresta)  
 $S_e$  = Resistencia a Fatiga del Material (Endurance)  
 $S_m$  = Esfuerzo Promedio  
 $S_y$  = Esfuerzo de Cedencia  
 $n$  = Factor de Seguridad

Donde el Esfuerzo Promedio se calcula como:

$$S_m = \frac{S_{m\acute{a}x} - S_{m\acute{m}n}}{2} \quad (2.15)$$

**Ecuaci3n 2.9** – Amplitud Nominal

Y donde el Esfuerzo Promedio se calcula como:

$$S_m = \frac{S_{m\acute{a}x} + S_{m\acute{m}n}}{2} \quad (2.16)$$

**Ecuaci3n 2.10** – Esfuerzo Promedio

## 2. Criterio de ASME El\iptico

$$\left(\frac{S}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{S_m}{S_y}\right)^2 \leq \frac{1}{n^2} \quad (2.17)$$

**Ecuaci3n 2.11** – Criterio de ASME El\iptico

$S$  = Amplitud Nominal  
 $S_e$  = Resistencia a Fatiga del Material  
 $S_m$  = Esfuerzo Promedio  
 $S_y$  = Esfuerzo de Cedencia  
 $n$  = Factor de Seguridad

## 3. Criterio de Goodman

$$\frac{S}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} \leq \frac{1}{n} \quad (2.18)$$

**Ecuaci3n 2.12** – Criterio de Goodman

$S$  = Amplitud Nominal  
 $S_e$  = Resistencia a Fatiga del Material  
 $S_m$  = Esfuerzo Promedio  
 $S_{ut}$  = Esfuerzo Último  
 $n$  = Factor de Seguridad

#### 4. Criterio de Gerber

$$\frac{nS}{S_e} + \left(\frac{nS_m}{S_{ut}}\right)^2 \leq 1 \quad (2.19)$$

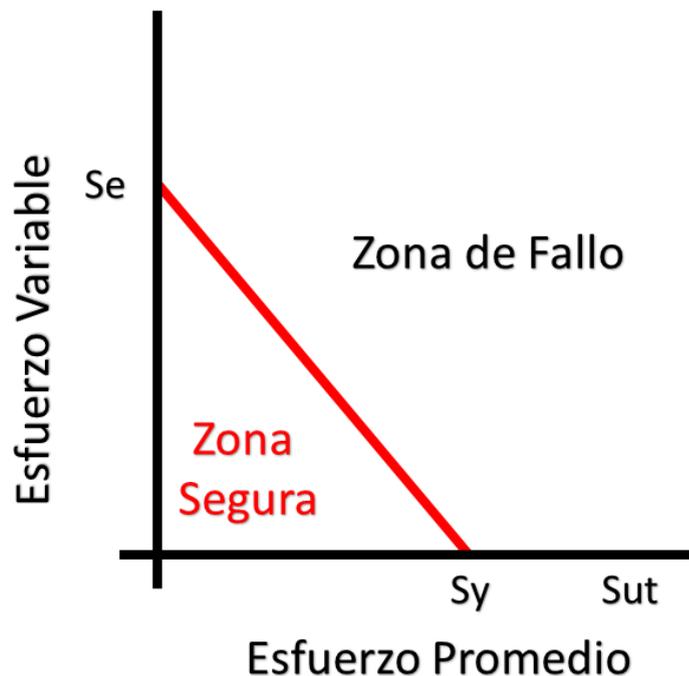
#### Ecuación 2.13 – Criterio de Gerber

$S$  = Amplitud Nominal  
 $S_e$  = Resistencia a Fatiga del Material  
 $S_m$  = Esfuerzo Promedio  
 $S_{ut}$  = Esfuerzo Último  
 $n$  = Factor de Seguridad

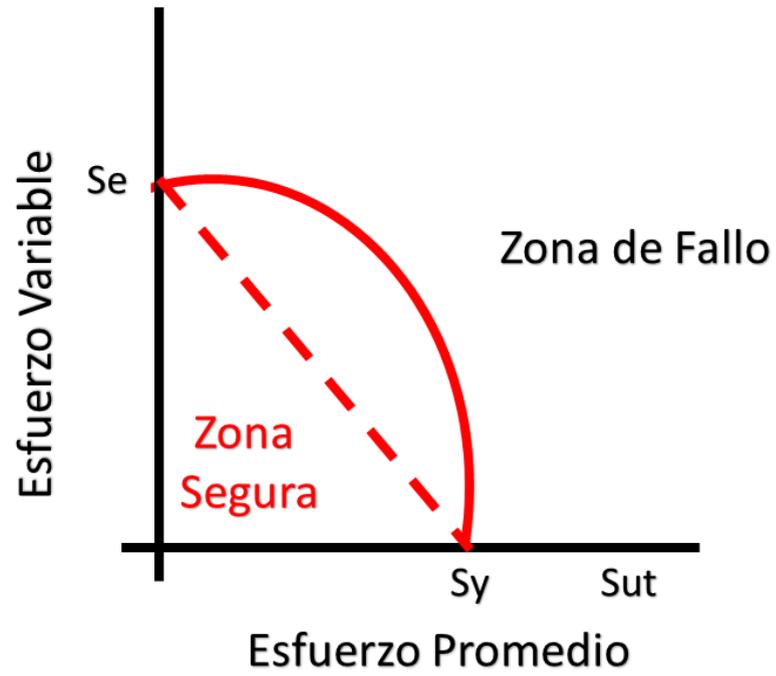
De los cuatro criterios, el Criterio de Goodman y el de Gerber se usan cuando el Esfuerzo Último es el de interés para el diseño del componente. El de Soderberg y el de ASME Elíptico se usan cuando el Esfuerzo de Cedencia es el de interés para el diseño del componente. En el caso de los componentes a desarrollar (los *Knuckles*), se usa el Esfuerzo de Cedencia debido a que, como los componentes rodeando al *Knuckle* se diseñan para estar ensamblados en una posición específica, si el *Knuckle* se deforma plásticamente, ya no se puede ensamblar por lo cual se vuelve inutilizable. Por lo tanto, nos enfocaremos en Soderberg y ASME Elíptico. <sup>47,48,49,50,51</sup>

La diferencia principal entre el Criterio de Soderberg y el de ASME Elíptico corresponde al grado de la ecuación. Tal como se observa en la **Figura 2.5**, si se grafica la ecuación de Soderberg uniendo los puntos del *Esfuerzo de Fatiga del Material* con el *Esfuerzo de Cedencia* del material, obtenemos una línea recta donde el área interior representa el área donde el componente tiene muy alta probabilidad de estar seguro, y el área fuera del triángulo generado representa el área de probabilidad de falla del componente. En cambio, si unimos los mismos puntos, pero usando la ecuación de ASME Elíptico, obtenemos una parábola, la cual se observa en la **Figura 2.6**. Dicha parábola tiene mayor área interior que la de la recta que surge de la ecuación de Soderberg. Esto se puede interpretar de la siguiente manera: el Criterio de Soderberg tiende más a la seguridad, mientras que el de ASME Elíptico tiende más a la exactitud. <sup>47,48,49,50,51</sup>

Analizando la interpretación dada anteriormente, y puesto en palabras de los objetivos de la tesis, el Criterio de Soderberg nos dará un Factor de Seguridad menor que el de ASME Elíptico, sin embargo, y cómo se ha mencionado anteriormente, los *Knuckles* usados en el equipo de Baja SAE® son usados por periodos de tiempo cortos, usualmente un año, el cuál corresponde, máximo, a 2 competencias y pruebas realizadas, antes de rediseñar o modificar el vehículo o componentes específicos. Por lo tanto, como no es de interés tener un *Knuckle* con vida infinita extrema, no resulta útil analizar el componente bajo un criterio basado en seguridad, sino en exactitud para poder optimizarlo mejor en futuras iteraciones. Por esta razón, se usará el Criterio de ASME Elíptico. <sup>47,48,49,50,51</sup>



**Figura 2.5** – Ecuación de Soderberg en una gráfica de *Esfuerzo Promedio vs Esfuerzo Variable*



**Figura 2.6** – Ecuación de ASME Elíptico en una gráfica de *Esfuerzo Promedio vs Esfuerzo Variable*

# Capítulo III. Optimización Topológica

## de los Knuckles

### *III. I. Fundamentos del Equipo*

#### *III.I. I. Casos Críticos del Knuckle*

Antes de proceder a realizar las optimizaciones topológicas de cada respectivo *Knuckle*, se deben entender algunos conceptos y datos que provienen del desarrollo y documentación realizada por el equipo de Baja SAE® UNAM. En primera instancia, tenemos el concepto de los casos críticos, los cuales corresponden a situaciones extremas donde el vehículo se ve en riesgo de sufrir alguna falla estructural. Estos se plantean a partir de dos tipos de situaciones:

- a) Situaciones que si ocurrieron al vehículo durante alguna etapa de la competencia, llevadas a su caso más extremo. Ejemplo:
  - a. Caso Crítico 1: Salto – En la competencia de México 2019, el vehículo saltó una rampa, y el *Knuckle* Delantero izquierdo se rompió de la parte inferior al momento de caer:



**Figura 3.1** – Vehículo del equipo de Baja SAE® UNAM con *Knuckle* Delantero izquierdo roto tras el salto de una rampa durante el *Endurance*

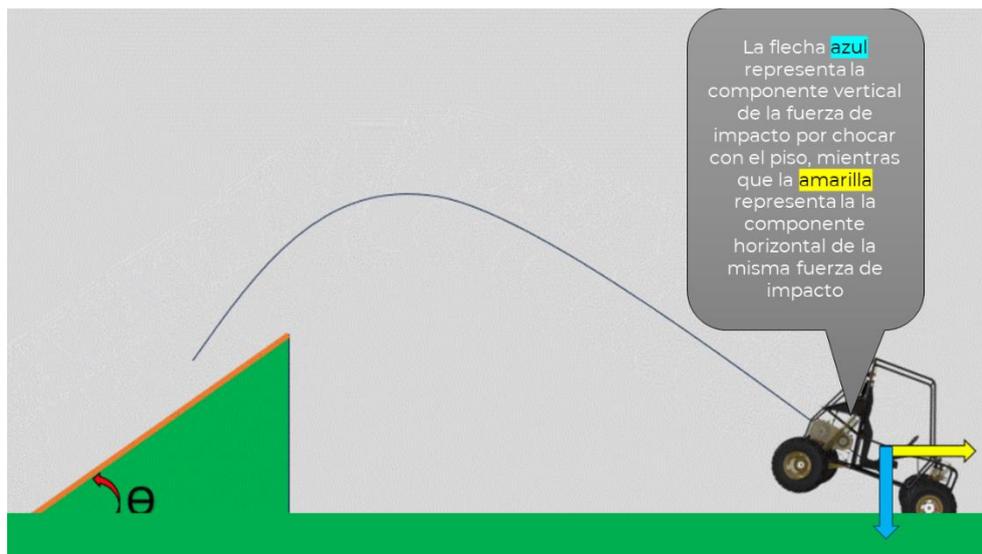
Por lo cual se desarrolló el Caso Crítico 1, en el cual se analiza justo esta situación del vehículo saltando una rampa, y cayendo sobre 2 llantas. El problema es que se desconocen las variables específicas que se tenían al instante en el que el *Knuckle* se rompió (como el ángulo de la pendiente), por lo cual se maximizan las fuerzas para simular la situación más crítica posible, como cuando la altura de la rampa que se salta es de 1.5 [m] (es la altura de rampa más alta en una competencia documentada por el equipo de Baja SAE® UNAM), a máxima velocidad, por mencionar algunos ejemplos.

- b) Situaciones propuestas mediante benchmarking, observando videos de accidentes en competencias de Baja SAE®, o accidentes que le ocurrieron a otros equipos. De igual manera, las fuerzas de cada caso se maximizan llevando cada situación a su variante más crítica considerando, por ejemplo, que el vehículo va a velocidad máxima.

A partir de ambas situaciones se propusieron 5 casos críticos en total, las cuales se desarrollan a continuación:

### III.I.I. I. Caso Crítico 1: Salto

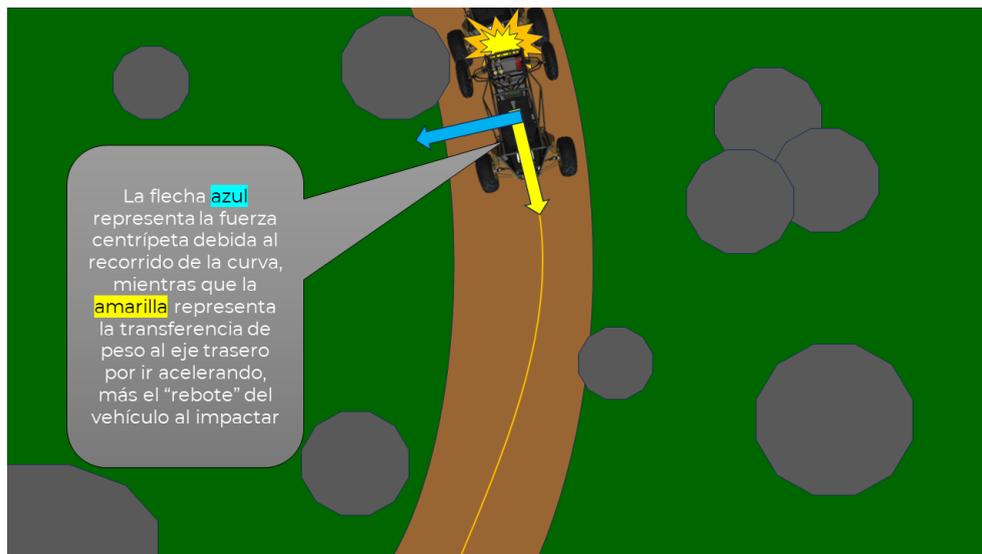
Este caso consiste en que el vehículo sube una rampa o pendiente a máxima velocidad y salta, cayendo sobre sólo dos llantas, así como se ilustra en la siguiente figura:



**Figura 3.2** – Descripción Visual del Caso Crítico 1: Salto

### III.I.I. II. Caso Crítico 2: Curva

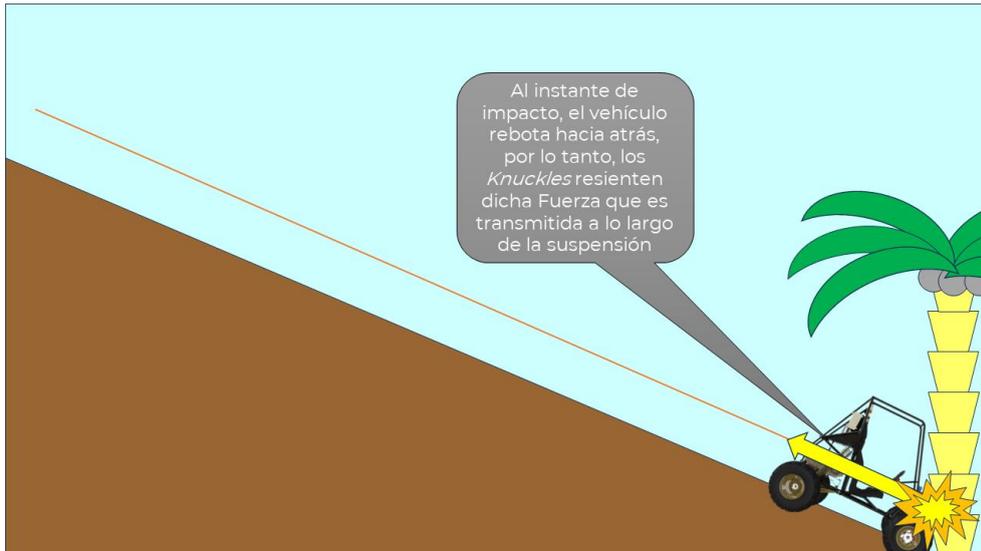
En esta situación, el vehículo toma una curva a máxima velocidad, e impacta de frente con un objeto, así como se visualiza en la siguiente imagen:



**Figura 3.3** – Descripción Visual del Caso Crítico 2: Curva

### III.I.I. III. Caso Crítico 3: Bajada

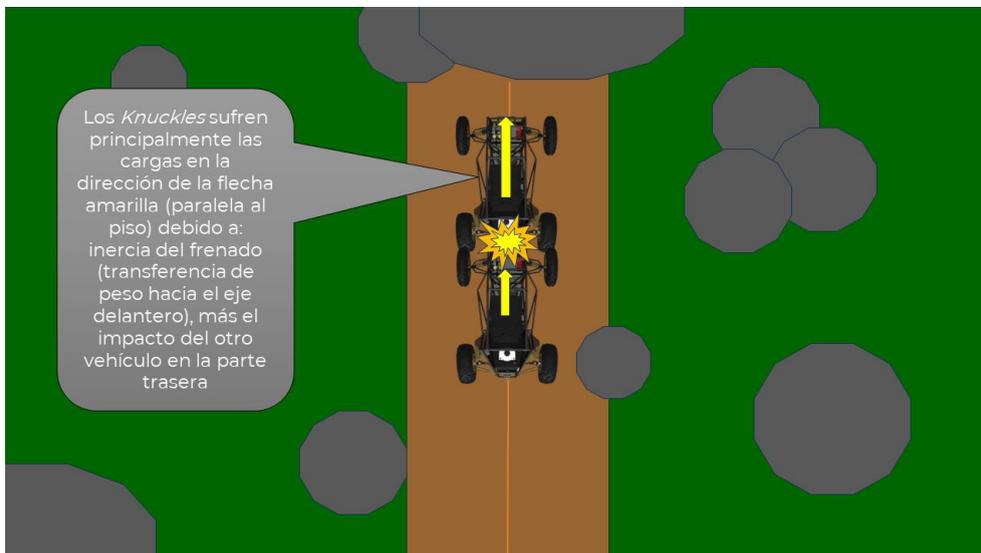
Aquí el vehículo se encuentra bajando una pendiente a máxima velocidad e impacta de frente contra un objeto. Este se vería de la siguiente manera:



**Figura 3.4** – Descripción Visual del Caso Crítico 3: Bajada

### III.I.I. IV. Caso Crítico 4: Frenado con Impacto

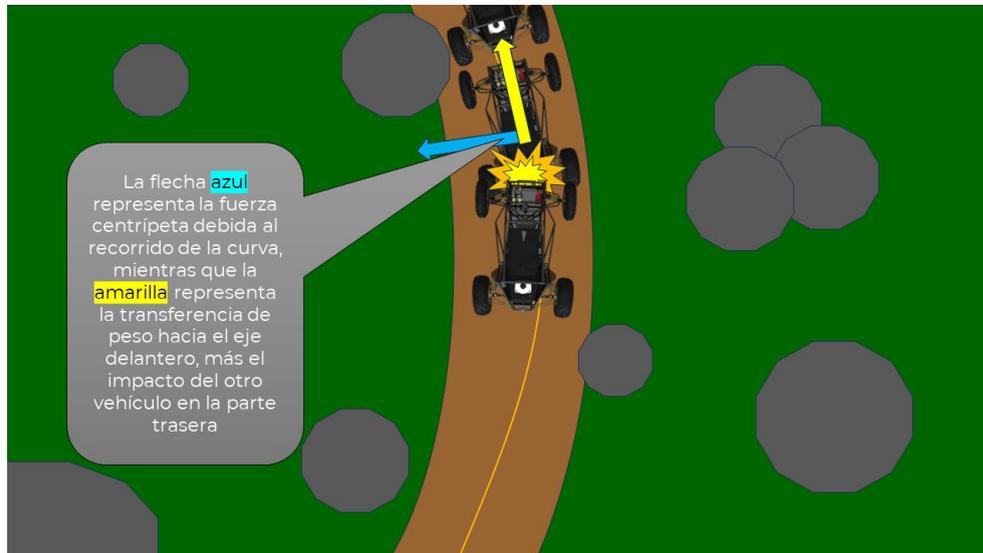
En esta situación, el vehículo va a toda velocidad, y frena repentinamente, por lo que otro vehículo le impacta, a máxima velocidad, en la sección trasera de la siguiente manera:



**Figura 3.5** – Descripción Visual del Caso Crítico 4: Frenado con Impacto

### III.I.I. V. Caso Crítico 5: Frenado en Curva

El vehículo frena mientras viaja por una curva, y es impactado por atrás por un vehículo que va a máxima velocidad, así como se observa en la siguiente imagen:



**Figura 3.6** – Descripción Visual del Caso Crítico 5: Frenado en Curva

Si bien es cierto que el “nivel de daño” que cada caso crítico genera en un *Knuckle* específico depende de su geometría en particular, simplificando los *Knuckles* delanteros y traseros actuales como barras, podemos observar que las fuerzas transversales en nuestra dirección Y (ver la **Figura 3.7** y la **Figura 3.8**) son las que más afectan al componente al ser el espesor de las piezas la dimensión de menor tamaño comparado con su largo y alto:

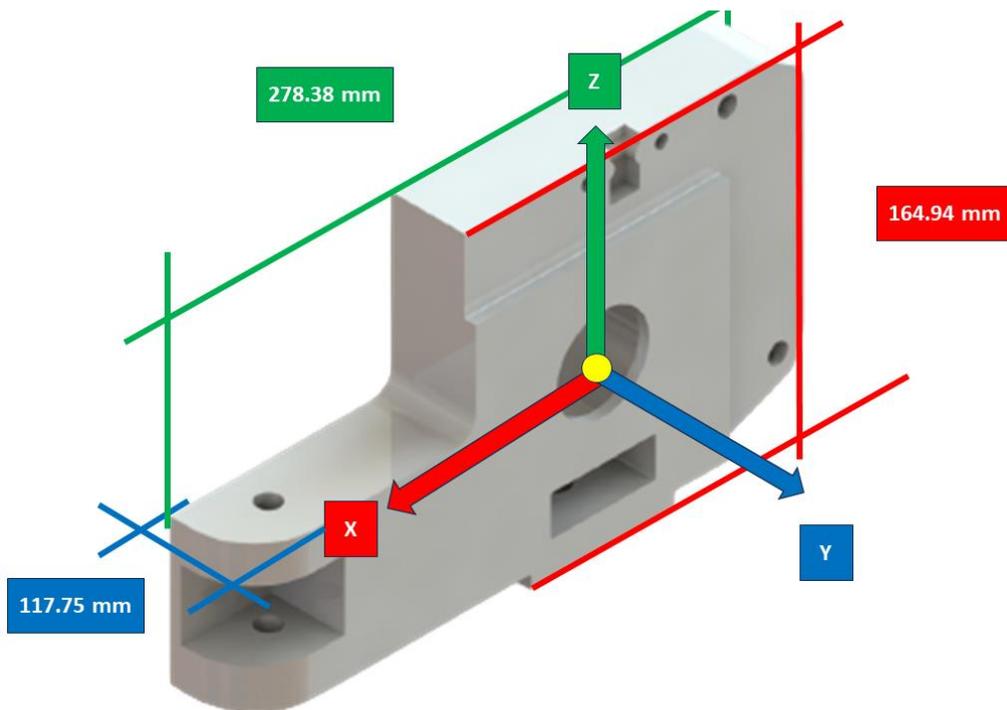


Figura 3.7 – Dimensiones del *Knuckle* delantero

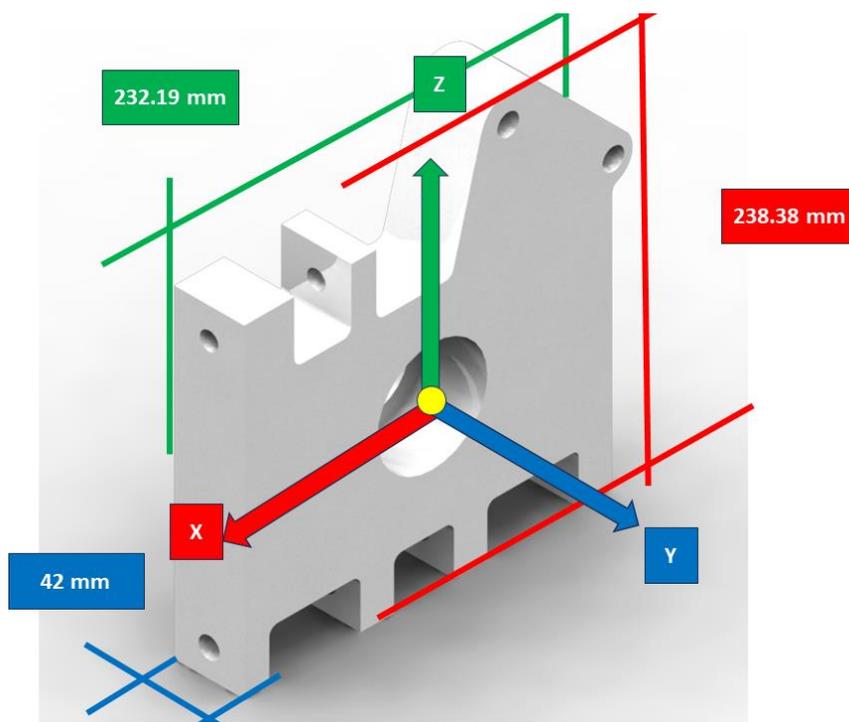


Figura 3.8 – Dimensiones del *Knuckle* trasero

Los casos críticos que incluyen dichas fuerzas transversales, son el Caso Crítico 2 y el Caso Crítico 5, mediante las fuerzas centrífugas y centrípetas que surgen al girar el vehículo. De los dos, se espera que el Caso Crítico 5 tenga un mayor impacto debido a la inclusión del Par de Frenado, el cual genera esfuerzos adicionales que no están presentes en el Caso 2. Esto se confirma al analizar los factores de seguridad en los análisis estáticos de los *Knuckles* en México 2021, detallados en las Tablas 3.1 (*Knuckle* delantero) y 3.2 (*Knuckle* trasero).

Caso crítico	F. de Seguridad Estático	¿Se cumple el Factor de Seguridad mínimo de 2?
1. Salto	4.45	Sí
2. Curva	2.14	Sí
3. Bajada	3.78	Sí
4. Frenado con impacto	2.90	Sí
5. Frenado en curva	1.85	No

**Tabla 3.1** - Resultados Finales de Factor de Seguridad para *Knuckle* Delantero en Diseño México 2021

Caso crítico	F. de Seguridad Estático	¿Se cumple el Factor de Seguridad mínimo de 2?
1. Salto	7.78	Sí
2. Curva	2.54	Sí
3. Bajada	2.45	Sí
4. Frenado con impacto	2.31	Sí
5. Frenado en curva	2.21	Sí

**Tabla 3.2** - Resultados Finales de Factor de Seguridad para *Knuckle* Trasero en Diseño México 2021

Podemos observar que el *Knuckle* trasero cumple con el factor de seguridad mínimo de 2 para todos los casos, y el delantero cumple para todos menos el Frenado en Curva, sin embargo, debido a que se acerca mucho a 2 se consideró como válido. Lo que esto significa para el trabajo, y buscando garantizar que el *Knuckle* final tenga un factor de seguridad impuesto, es que el *Knuckle* será optimizado en función del Caso Crítico 5.

### III.I. II. Diagramas de Cuerpo Libre

Ahora que se conocen las posibles situaciones donde el *Knuckle* se puede fracturar, debemos entender cómo se puede fracturar. Para esto, si bien cada caso crítico tiene su propio Diagrama de Cuerpo Libre, primero se debe entender qué interacciones tiene el *Knuckle* que puedan transmitirle fuerzas. Esto se observa a continuación:

#### III.I.II. I. *Knuckle* Delantero

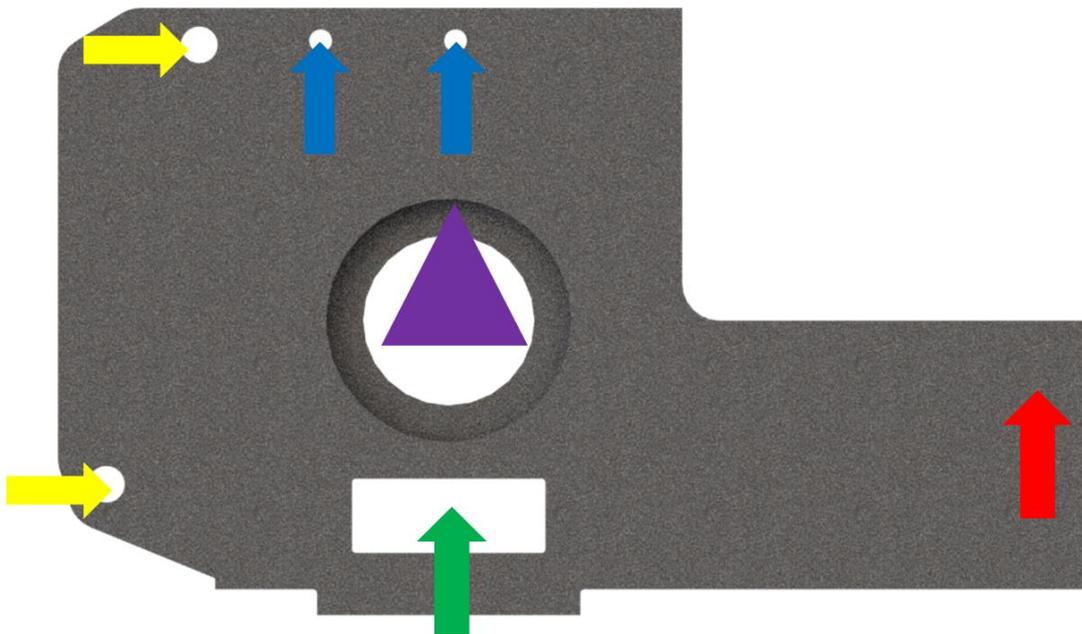


**Figura 3.9** – Ensamble de Masas No Suspendidas con Suspensión y Dirección en región delantera del vehículo (imagen proporcionada por Baja SAE® UNAM)

Para dicho componente tendremos 4 zonas de transmisión de Fuerzas, las cuales se conforman por:

- a) Brazo A Superior (Flechas Azules)
- b) Brazo A Inferior (Flecha Verde)
- c) Portacaliper (Flechas Amarillas)
- d) Bieleta de la Dirección (Flecha Roja)

Y también, tendremos una zona Fija para el análisis la cual, considerando a la Llanta como el elemento Fijo, estará conformado por el Barreno para el Rodamiento. (Triángulo Morado)



**Figura 3.10** – Knuckle Delantero Diagrama de Cuerpo Libre

### III.I.II. II. *Knuckle* Trasero

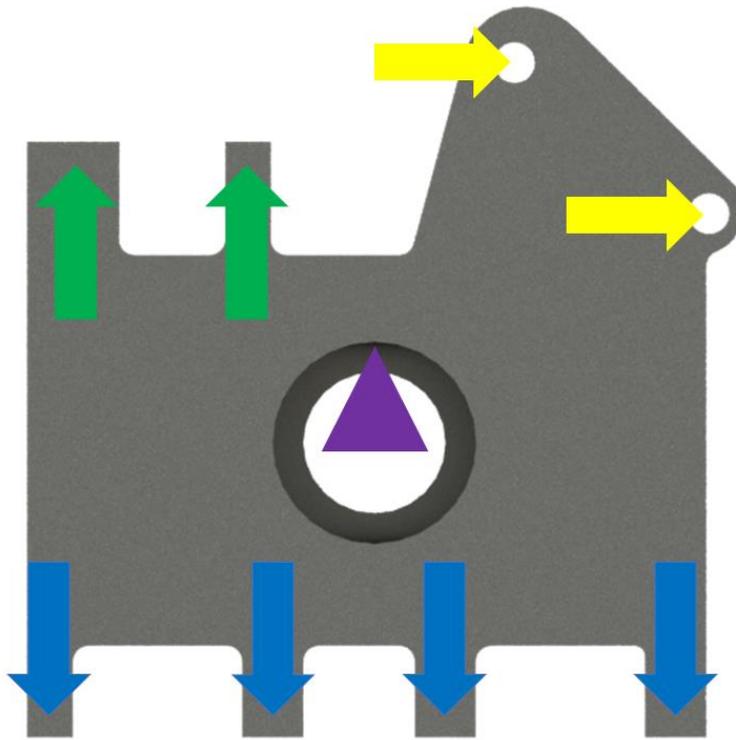


**Figura 3.11** – Ensamble de Masas No Suspendidas con Suspensión en región trasera del vehículo (imagen proporcionada por Baja SAE® UNAM)

Para dicho componente tendremos 3 zonas de transmisión de Fuerzas, las cuales se conforman por:

- a) Brazo H (Flechas Azules)
- b) Brazo Seguidor (Flecha Verde)
- c) Portacaliper (Flechas Amarillas)

Y también, tendremos una zona Fija para el análisis la cual, considerando a la Llanta como el elemento Fijo, estará conformado por el Barreno para el Rodamiento. (Triángulo Morado)



**Figura 3.12** – *Knuckle* Trasero Diagrama de Cuerpo Libre

Es importante recalcar, que las flechas aquí mostradas, solamente indican las zonas donde se aplicarán las fuerzas para los casos críticos. La dirección y magnitud de las Fuerzas dependerá del Caso Crítico que se analice. Además, para ambos *Knuckles*, se considera el resto del vehículo como un solo elemento rígido, por lo cual las Fuerzas que “entran” al mismo se transmiten directamente al *Knuckle*, sin pérdidas.

## III. II. Optimización Estructural del Knuckle

### Delantero

#### III.II. I. Función Objetivo

Para este paso, se retomará el objetivo de reducción de peso detallado en el primer capítulo. El formato en el que se debe ingresar al software es como el porcentaje máximo de masa destino deseado, por lo cual empezaremos planteando una regla de 3:

$$\frac{w_{actual}}{w_{reducir}} = \frac{100\%}{x\%} \quad (3.1)$$

Donde:

$w_{reducir}$  = Peso que se quiere reducir del Knuckle = 1.812[Kg]

$w_{actual}$  = Peso actual del Knuckle = 4.727[Kg]

$x\%$  = Porcentaje que el peso a reducir ( $w_{reducir}$ ) representa de nuestro 100% ( $w_{actual}$ )

Despejando  $x\%$  tenemos:

$$x\% = \left( \frac{w_{reducir} \times 100\%}{w_{actual}} \right) \quad (3.2)$$

Pero como el software pide el porcentaje máximo de masa a mantener tras el análisis, no requerimos el porcentaje que se remueve, sino el que se mantiene, el cual se representa como el complemento de  $x\%$  de la siguiente manera:

$$y\% = 100\% - x\% = 100\% - \left( \frac{w_{reducir} \times 100\%}{w_{actual}} \right) \quad (3.3)$$

Donde:

$y\%$  = Peso máximo que se quiere mantener del Knuckle

Sustituyendo en (3.3):

$$y\% = 100\% - \left( \frac{1.812[Kg] \times 100\%}{4.727[Kg]} \right)$$

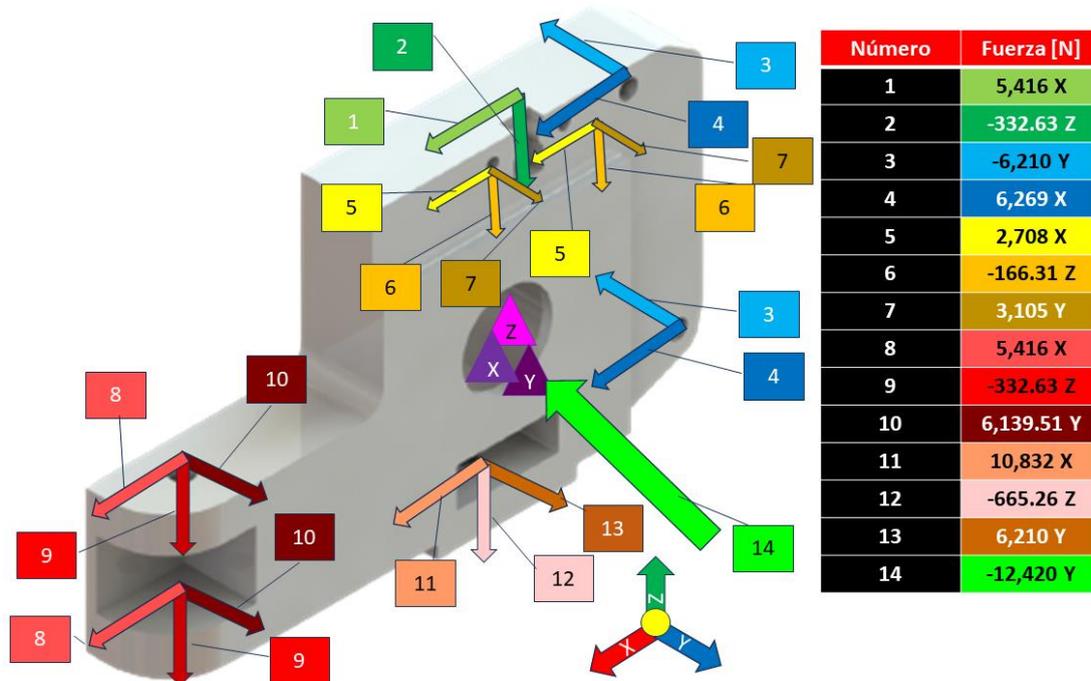
$$y\% = 61.66\%$$

Por lo tanto, nuestra función objetivo que entrará al software será:

$$w_{final} \leq 61.66\% (w_{actual})$$

### III.II. II. Restricciones de Equilibrio

Partiendo de la **Figura 3.10**, y debido a que, como se mencionó anteriormente, el *Knuckle* se optimizará en función del Caso Crítico 5, se desarrollará a detalle el Diagrama de Cuerpo Libre de este caso crítico, donde las flechas representarán la dirección de las fuerzas, los puntos de intersección (origen) de las flechas se ubicarán en los barrenos donde se aplican las fuerzas, y los triángulos indicarán en qué eje estarán fijos los nodos de esos barrenos. Esto se observa a continuación:



**Figura 3.13** – Diagrama de Cuerpo Libre para el *Knuckle* Delantero Derecho bajo el Caso Crítico 5: Frenado en Curva

Es importante señalar, que los valores de las cargas fueron calculados por el equipo de Baja SAE® UNAM con sus datos. Para evitar aumentar la longitud de la tesis, se tomarán como válidas dichas cargas y no se profundizará en las ecuaciones detrás de las mismas. Siguiendo el Diagrama de Cuerpo Libre planteado en la **Figura 3.13**, se van colocando todas las fuerzas y restricciones relacionadas al Caso Crítico 5.

### *III.II. III. Restricciones de Tensiones y Deformaciones*

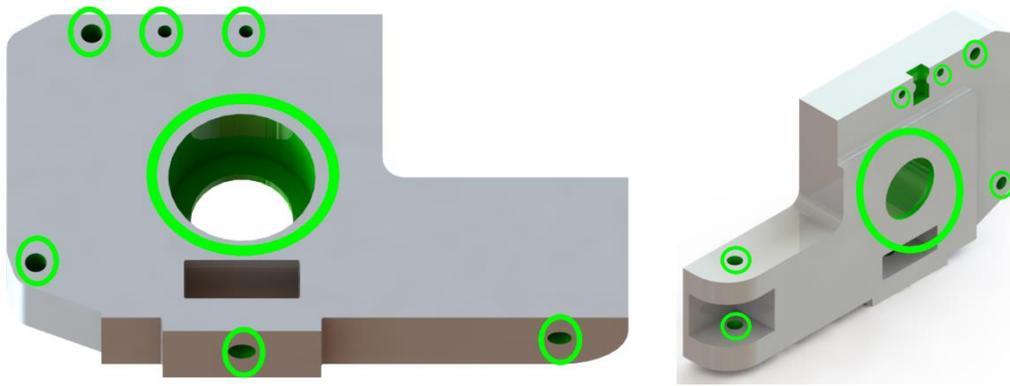
Para esta sección, se utilizará el Factor de Seguridad de 1.5 impuesto en la **Tabla 1.3** como objetivo de esta tesis como entrada al software.

La lógica es que si el Caso Crítico 5 fue el que mayores esfuerzos generó sobre la geometría, entonces el forzar que la Optimización Topológica tenga un factor de seguridad mínimo en dicho caso crítico, debería significar que los demás casos críticos tendrán factores de seguridad mayores (debido a que tendrían esfuerzos máximos menores al del Caso Crítico 5).

Si bien se sabe que esto no es necesariamente cierto ya que depende de la geometría optimizada, sirve como primer acercamiento al problema. Además, esta idealización inicial, será compensada posteriormente con la realización de los análisis estáticos para todos los casos críticos en la sección de validaciones.

### *III.II. IV. Restricciones de Geometría*

En verde se muestran todas aquellas regiones que se conservaron. Se puede observar que consisten en todos aquellos elementos necesarios para el ensamble del *Knuckle* con el resto del sistema (rodamiento para la llanta, cáliper, suspensión, etc.).

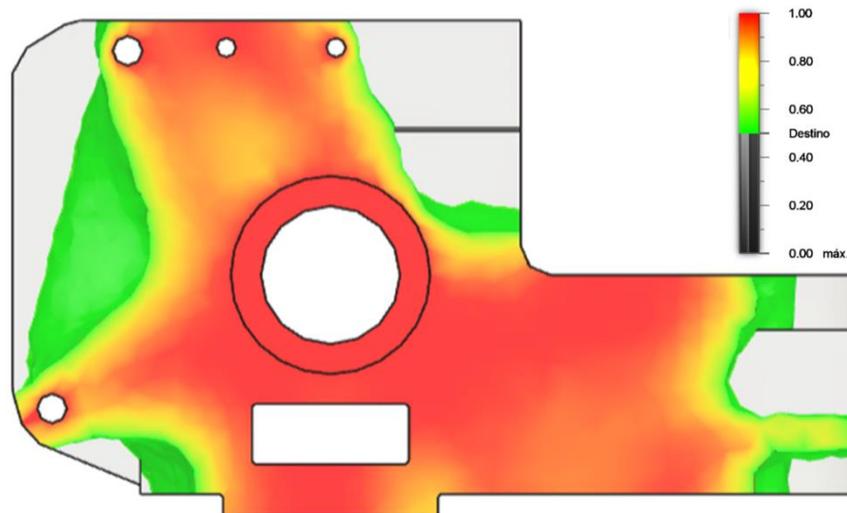


**Figura 3.14** – Regiones a conservar en el *Knuckle* delantero

Un aspecto importante a considerar al seleccionar el software para realizar la optimización topológica es que algunos softwares (como el usado para la tesis), incluyen un aspecto en su programación con el cual dichos puntos se mantienen conectados por material intermedio tras la optimización topológica, sin embargo, hay otros que no incluyen esto y, tras la optimización, resultarán varias secciones sueltas que rodean dichas regiones conservadas (como islas).

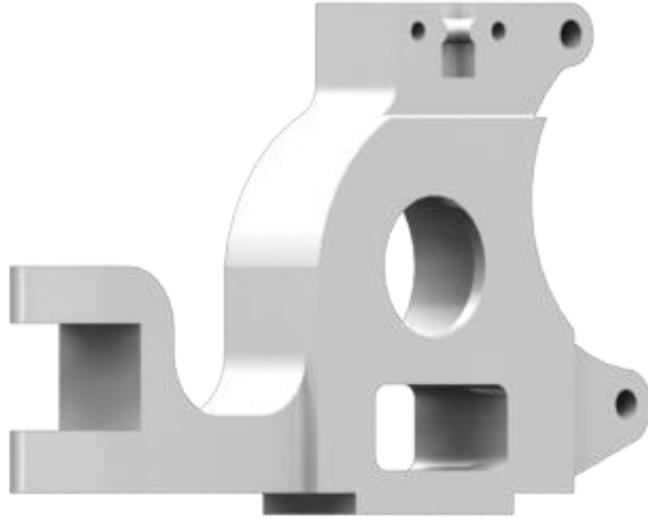
### *III.II. V. Salidas*

El resultado obtenido fue:



**Figura 3.15** – Resultado de la Optimización Estructural del *Knuckle* Delantero

En donde la zona roja representa el 100% de la masa, lo cual nos indica que, en esa zona, el material debe permanecer, y la zona sin color representa todas aquellas zonas donde el material se puede remover, por lo cual, regresamos al software de diseño para modificar la pieza, lo cual queda de la siguiente manera:



**Figura 3.16 – Knuckle Delantero con reducción de peso**

Es importante aclarar, que este diseño no salió a la primera vez de remover material. Fue un proceso iterativo en el cual se realizó la reducción de peso, y se analizó dicho componente mediante el análisis de los 5 casos críticos antes mencionado para verificar que el *Knuckle* resultante cumpliera con el factor de seguridad impuesto de 1.5. Una vez realizados los 5 casos críticos, se observaron todos aquellos que no cumplieran con el factor de seguridad, y se aumentaba el material en las zonas de mayores esfuerzos. Se volvían a realizar los 5 análisis y se verificaban los resultados.

Debido a que un proceso iterativo puede ser infinito buscando la solución “perfecta”, se impusieron dos limitantes: la primera, detener el proceso iterativo en cuanto el componente tuviera el factor de seguridad deseado en todos los casos críticos, o segunda, realizar un máximo de 5 iteraciones buscando que al menos el 60% de los casos críticos pasen, y el 40% restante tengan, por lo menos, un factor de seguridad impuesto del 1.30.

## III. III. Optimización Estructural del Knuckle

### Trasero

#### III.III. I. Función Objetivo

Siguiendo la misma lógica y proceso que la Función Objetivo del *Knuckle* delantero, se tiene:

$$y\% = 100\% - x\% = 100\% - \left( \frac{w_{reducir} \times 100\%}{w_{actual}} \right) \quad (3.4)$$

Donde:

$y\%$  = Peso máximo que se quiere mantener del *Knuckle*

$w_{reducir}$  = Peso que se quiere reducir del *Knuckle* = 1.894 [Kg]

$w_{actual}$  = Peso actual del *Knuckle* = 3.9 [Kg]

$x\%$  = Porcentaje que el peso a reducir ( $w_{reducir}$ ) representa de nuestro 100% ( $w_{actual}$ )

Sustituyendo en (3.4):

$$y\% = 100\% - \left( \frac{1.894[Kg] \times 100\%}{3.9[Kg]} \right)$$

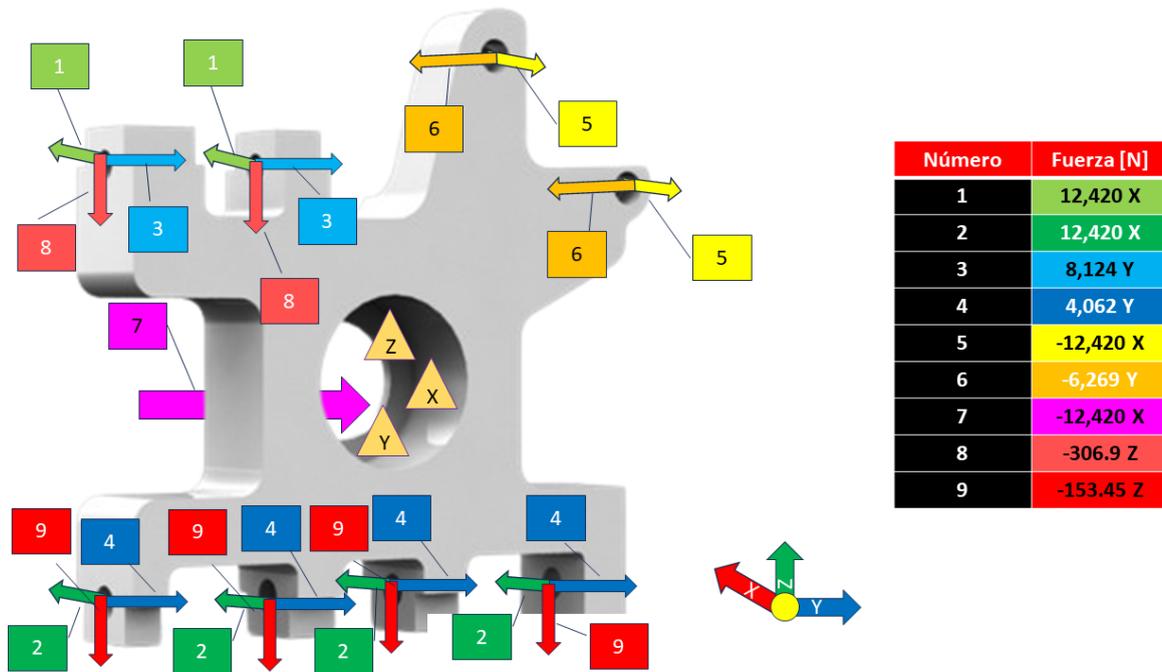
$$y\% = 51.44\%$$

Por lo tanto, nuestra función objetivo que entrará al software será:

$$w_{final} \leq 51.44\% (w_{actual})$$

### III.III. II. Restricciones de Equilibrio

Partiendo de la **Figura 3.12**, y siguiendo la misma lógica del *Knuckle* delantero, en el *Knuckle* trasero se colocarán las fuerzas en los barrenos donde se conectan a los elementos que transfieren dichas fuerzas. La dirección, posición y magnitud de cada fuerza se indica en la **Figura 3.17**, y todos aquellos nodos que se fijan en un eje determinado se pueden identificar con los triángulos que se observan:



**Figura 3.17** - Diagrama de Cuerpo Libre para el Knuckle Trasero Derecho bajo el Caso Crítico 5: Frenado en Curva

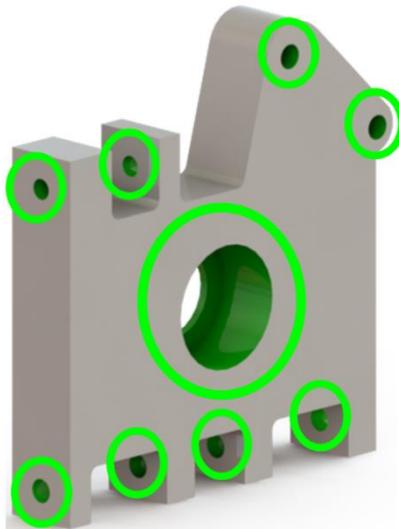
Es importante señalar, que los valores de las cargas fueron calculados por el equipo de Baja SAE® UNAM con sus datos. Para evitar aumentar la longitud de la tesis, se tomarán como válidas dichas cargas y no se profundizará en las ecuaciones detrás de las mismas. Siguiendo el Diagrama de Cuerpo Libre planteado en la **Figura 3.17**, se van colocando todas las fuerzas y restricciones relacionadas al Caso Crítico 5.

### III.III. III. Restricciones de Tensiones y Deformaciones

Siguiendo la misma lógica que se siguió para el *Knuckle* delantero, se utilizará el Factor de Seguridad de 1.5 impuesto en la **Tabla 1.3** como objetivo de esta tesis como entrada al software. Al igual que el *Knuckle* delantero, esta idealización inicial será compensada posteriormente con la realización de los análisis estáticos para todos los casos críticos en la sección de validaciones.

### III.III. IV. Restricciones de Geometría

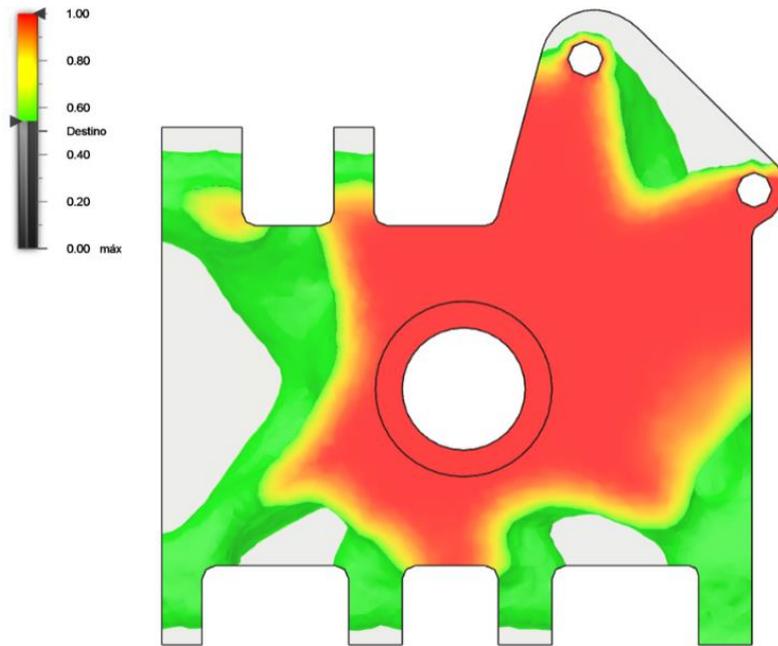
En verde se muestran todas aquellas regiones que se conservaron. Se puede observar que consisten en todos aquellos elementos necesarios para el ensamble del *Knuckle* con el resto del sistema (rodamiento para la llanta, cáliper, suspensión, etc.):



**Figura 3.18** – Regiones a conservar en el *Knuckle* trasero

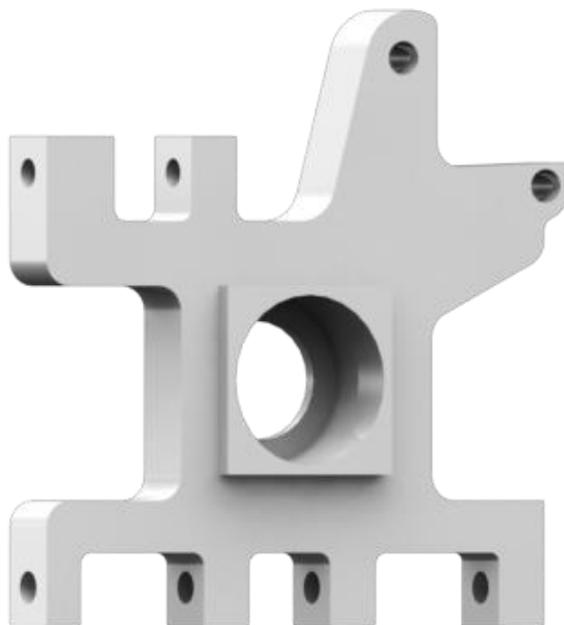
### III.III. V. Salidas

El resultado obtenido fue:



**Figura 3.19** - Resultado de la Optimización Estructural del *Knuckle* Delantero

En donde la zona roja representa el 100% de la masa, lo cual nos indica que, en esa zona, el material debe permanecer, y la zona sin color representa todas aquellas zonas donde el material se puede remover, por lo cual, regresamos al software de diseño para modificar la pieza, lo cual queda de la siguiente manera:

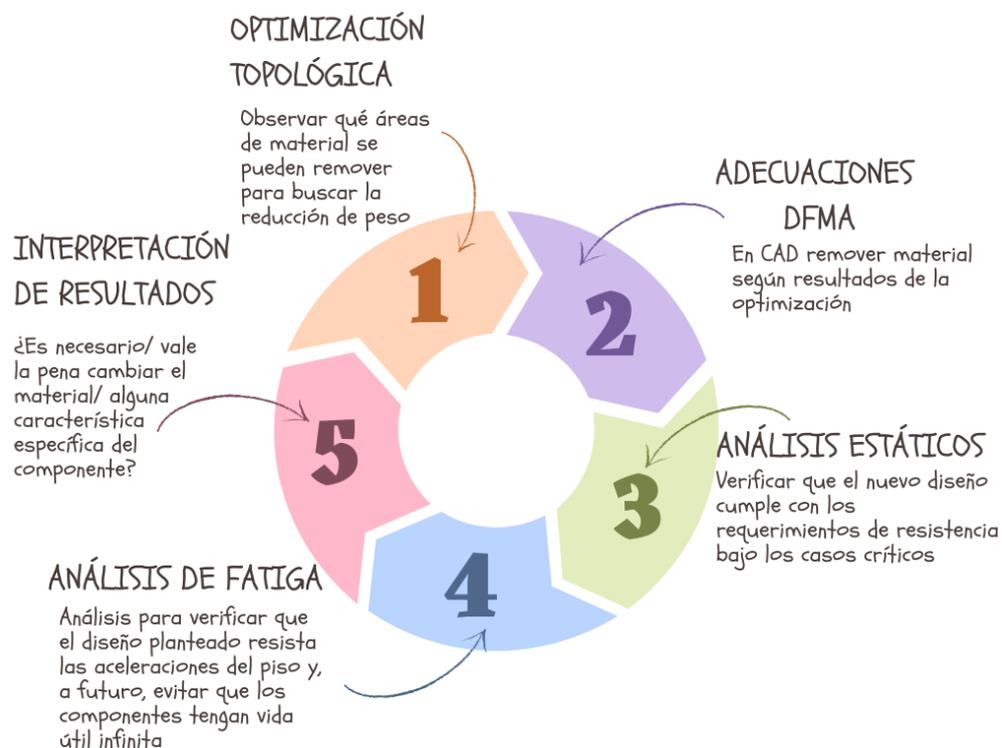


**Figura 3.20** - *Knuckle* Trasero con reducción de peso

# Capítulo IV. Validación de los diseños optimizados de los Knuckles

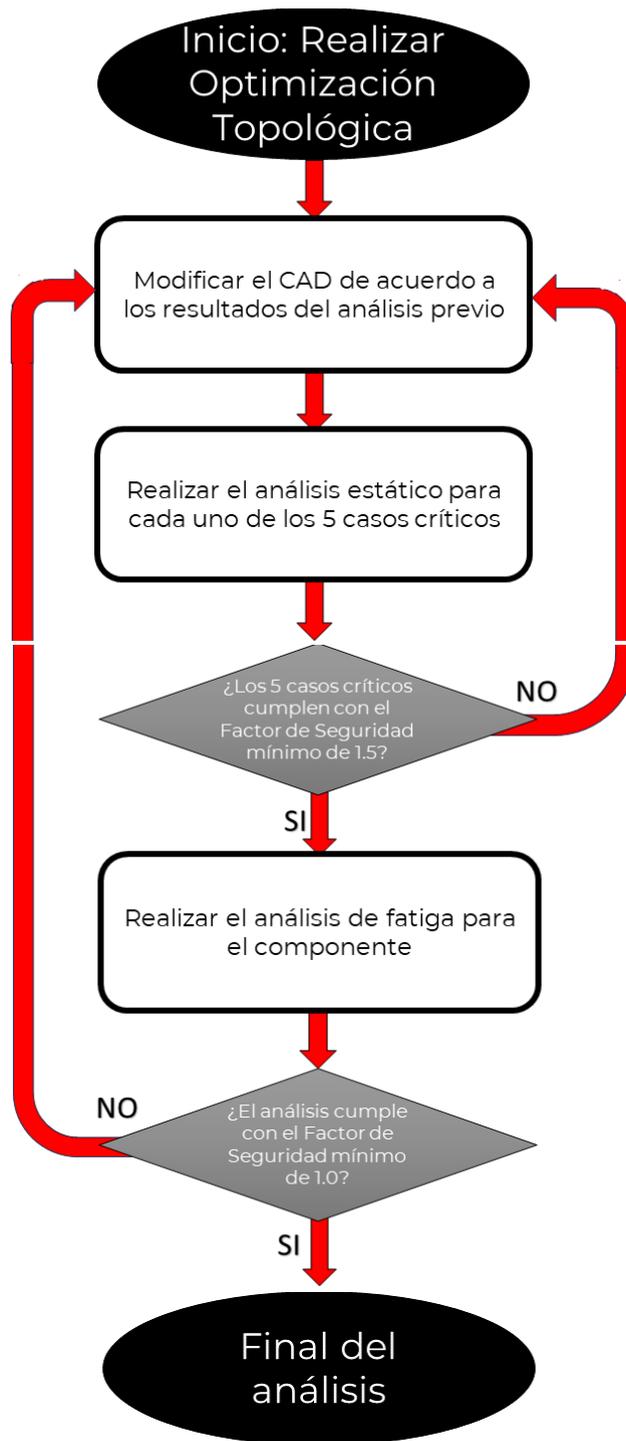
## IV. I. Validaciones a realizar

Retomando la Figura:



**Figura 4.1 –** Figura 1.13 - Ciclo iterativo de diseño planteado para la reducción de peso de los *Knuckles*

Los pasos 1 y 2, fueron abarcados en el **Capítulo III. Optimización Topológica de los *Knuckles***; ahora que se tiene un componente optimizado, se deberán realizar los pasos 3 al 5. Es importante recordar, que los diseños optimizados mostrados en el capítulo anterior son resultado de realizar estos 5 pasos de manera iterativa:



**Figura 4.2** – Diagrama de Flujo del proceso iterativo de los 5 pasos de rediseño del *Knuckle*

Para evitar alargar la longitud del documento, sólo se mostrarán los resultados de los componentes optimizados finales.

## *IV. II. Validaciones Finales del Knuckle Delantero*

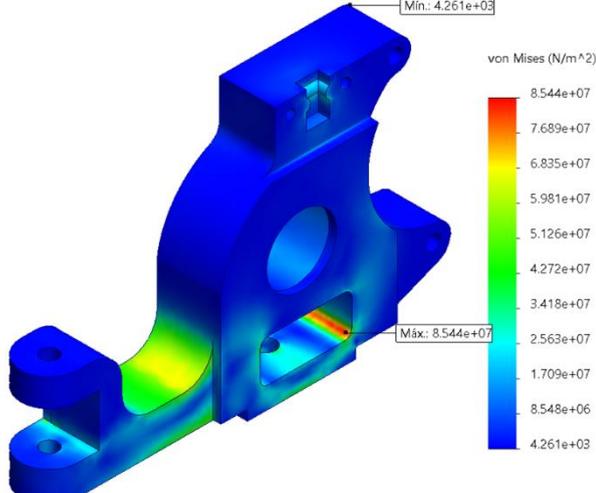
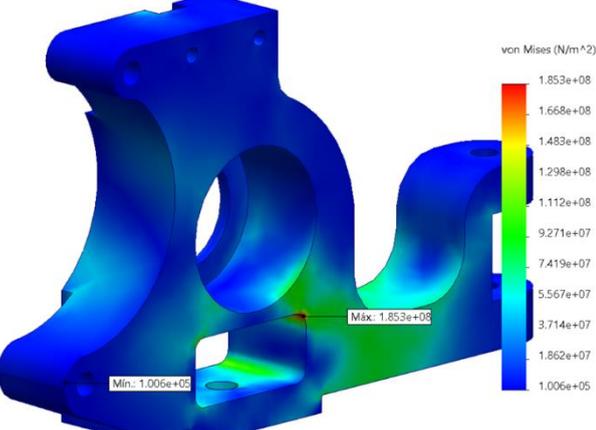
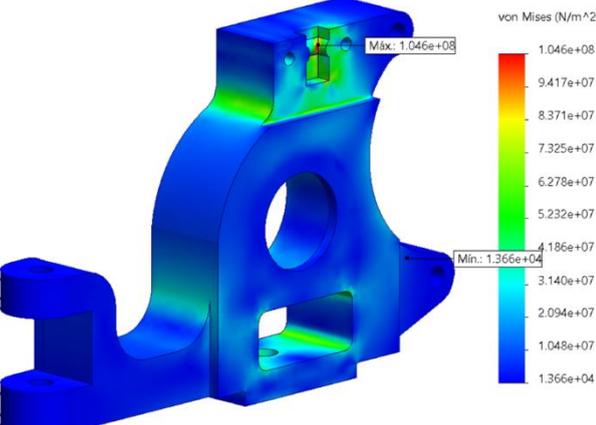
### *IV.II. I. Análisis Estáticos*

La **Tabla 4.1** corresponde a toda la información general que aplica para los 5 Casos Críticos:

Característica	Valor	Característica	Valor
Material	Aluminio 6061 T6	Factor de Seguridad Mínimo	1.5
Tipo de Malla	Mixto	Criterio de Cedencia	Von Mises
Límite Elástico	290 [MPa]		

**Tabla 4.1** – Características generales de todos los análisis estáticos para los 5 Casos Críticos

La **Tabla 4.2** corresponde al resumen de los resultados obtenidos al realizar los 5 Casos Críticos con el componente ya optimizado (**Figura 3.16**). En la última columna denominada “*Factor de Seguridad*”, se calculó el mismo dividiendo el Límite Elástico de 290 megapascuales del material usado, entre el Esfuerzo Máximo obtenido (columna 3 de la **Tabla 4.2**), de igual manera en megapascuales. El color asignado en la columna de “*Factor de Seguridad*” corresponde a un código de colores en el cual en **Rojo** se marcan aquellos factores de seguridad que no cumplieron con el mínimo planteado en los objetivos de 1.5. En **Verde** se encuentran todos aquellos que si cumplen con dicho factor de seguridad:

Caso Crítico	Resultados de Análisis	Esfuerzo Máximo	Factor de Seguridad
1.- Salto	 <p>von Mises (N/m<sup>2</sup>)</p> <p>Min.: 4.261e+03</p> <p>Máx.: 8.544e+07</p>	85.44 [MPa]	3.39
2.- Curva	 <p>von Mises (N/m<sup>2</sup>)</p> <p>Min.: 1.006e+05</p> <p>Máx.: 1.853e+08</p>	185.3 [MPa]	1.56
3.- Bajada	 <p>von Mises (N/m<sup>2</sup>)</p> <p>Min.: 1.366e+04</p> <p>Máx.: 1.046e+08</p>	104.6 [MPa]	2.77

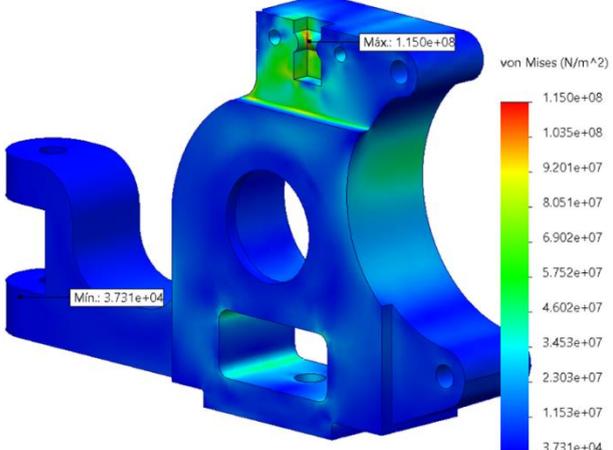
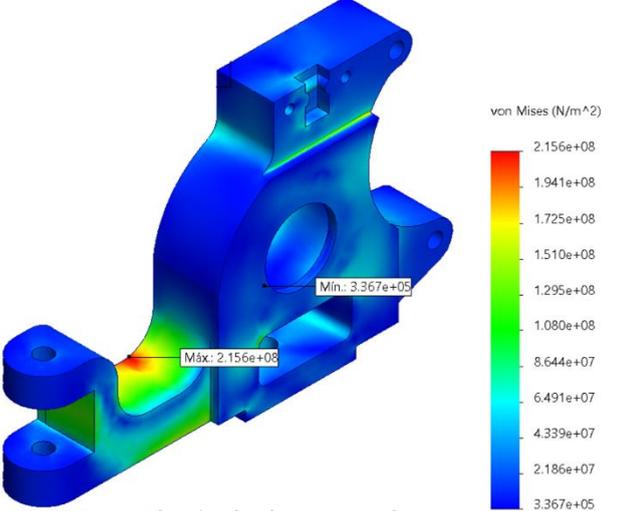
Caso Crítico	Resultados de Análisis	Esfuerzo Máximo	Factor de Seguridad
4.- Frenado con Impacto		115 [MPa]	2.52
5.- Frenado en Curva		215.6 [MPa]	1.35

Tabla 4.2 – Resultados de los análisis estáticos para los 5 Casos Críticos

Si bien es cierto que la optimización topológica se realizó en función al Caso Crítico 5 (el cual no pasa el factor de seguridad objetivo de 1.5), esto ocurre por diversas razones que serán explicadas en las conclusiones del presente trabajo.

## IV.II. II. Análisis de Fatiga

### IV.II.II. I. Obtención de Aceleraciones

El primer paso que se realizó, fue buscar las posibles pistas que se pueden usar para probar el vehículo, como, por ejemplo:

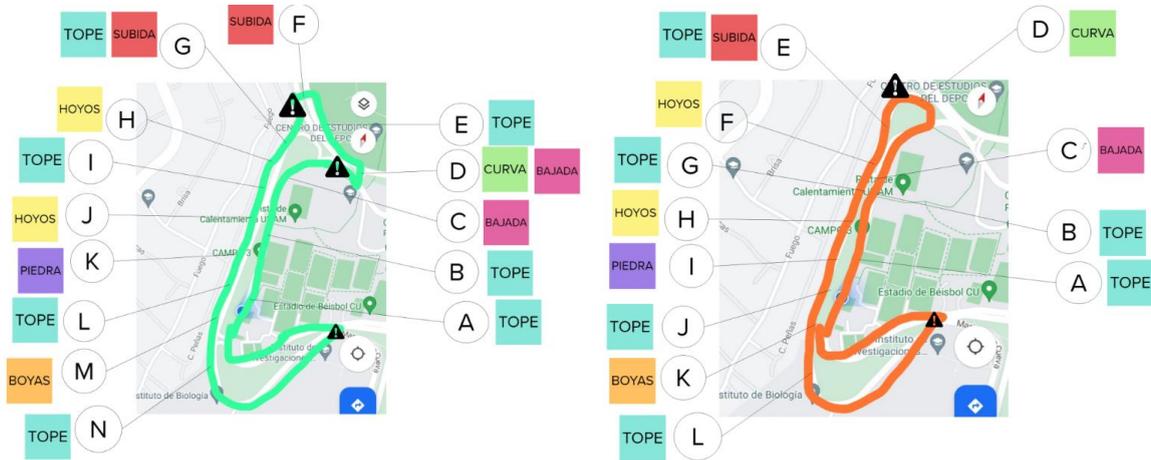
- a) Primera pista: Parque “Las Maravillas”
  - a. Tipo principal de terreno: Tierra suelta
  - b. Se tienen dos circuitos en el mismo parque (mostradas en la **Figura 4.3**), así como zonas libres para el análisis de pruebas más pequeñas.
  - c. Cuenta con una zona para estudio de pendiente.
  - d. Elementos del terreno:
    - i. Una zona empedrada
    - ii. Una zona desnivelada
    - iii. Ligeros relieves
    - iv. Varias zonas con hoyos



**Figura 4.3** – Pistas que se pueden generar en Parque “Las Maravillas”

- b) Segunda pista: Estadio de beisbol en C.U.
  - a. Tipo principal de terreno: Pavimento
  - b. Se tienen dos circuitos en el mismo parque (mostradas en la **Figura 4.4**)
  - c. Elementos del terreno:
    - i. Topes

- ii. Una zona de pocas piedras grandes
- iii. Una zona con boyas
- iv. Varias zonas con hoyos
- v. Zonas donde se debe tener cuidado con el paso de vehículos (marcadas con signo de exclamación)



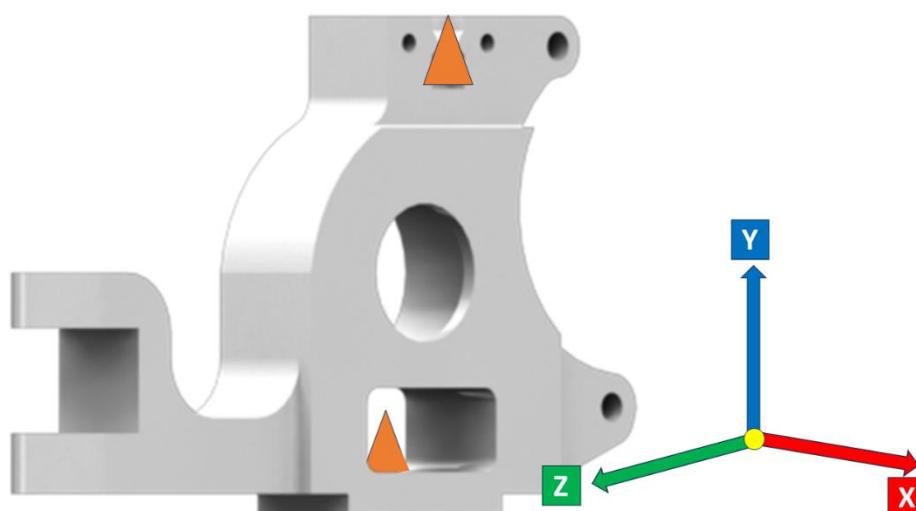
**Figura 4.4 – Pistas que se pueden generar en Estadio de Beisbol CU**

Si bien el proceso de benchmarking de pistas se realizó con el vehículo tipo Baja en mente (ya que el objetivo principal original de la tesis era obtener datos reales con el vehículo), no hubo ningún vehículo tipo Baja disponible por la duración de la tesis, por lo que se optó por realizar las pruebas con un vehículo comercial privado. Por esta razón, y debido a que el vehículo seleccionado no es todo terreno, se optó por la segunda pista, cuyo tipo principal de terreno es pavimento.

Otro aspecto importante a resaltar, es que a la par del proceso de selección de pistas, se diseñó un Manual de Pruebas para el vehículo tipo Baja para poder obtener los datos específicos requeridos, sin embargo, realizar las maniobras planteadas no son posibles con el vehículo comercial seleccionado, por lo que la obtención de aceleraciones se simplificará a colocar un celular en el piso del carro, lo más cercano a una llanta posible, y se recorrerán las pistas planteadas, y se compararán los resultados obtenidos en cada pista. A pesar de esto, el Manual de Pruebas se adjuntará como anexo (**Anexos A y B**) a la tesis como evidencia del plan original de la tesis (esta idea será desarrollada en las conclusiones) y para cualquier futuro equipo que le sirva de referencia.

## IV.II.II. II. Análisis Modal

Como se menciona en el **Capítulo 2. Antecedentes**, el análisis modal determina las frecuencias naturales a las cuales el componente entra en resonancia, pero lo hace sin considerar cargas externas debido a que dichas frecuencias son características intrínsecas del material. Por lo tanto, el Diagrama de Cuerpo Libre de este análisis se plantea solamente con aquellos elementos que fijan al *Knuckle*, los cuales serían los brazos de control de la suspensión lo cual queda como:



**Figura 4.5** – Diagrama de Cuerpo Libre del *Knuckle* Delantero para Análisis Modal

Tras fijar dichas regiones del componente y realizar el análisis, se obtuvieron las siguientes frecuencias:

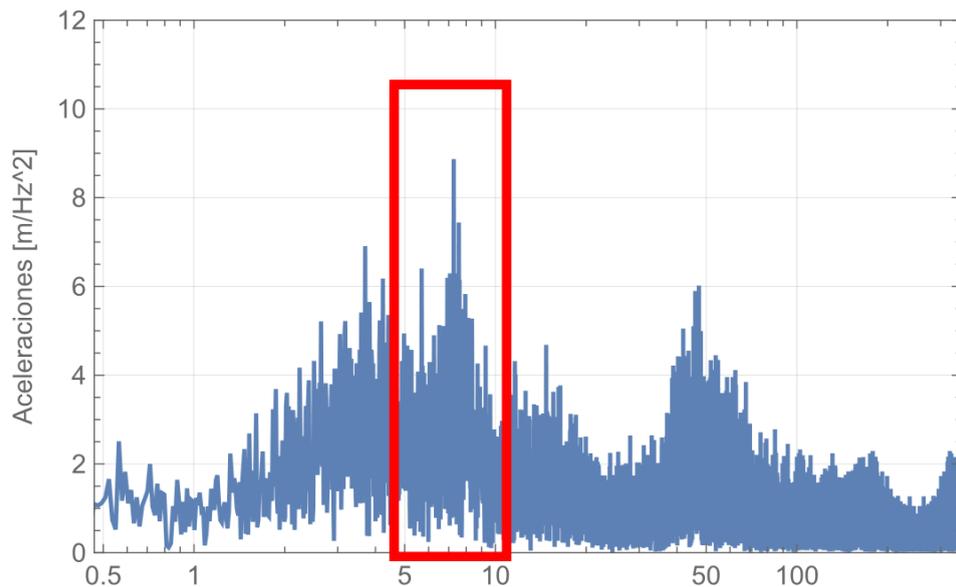
Frecuencia	Participación X	Participación Y	Participación Z
Modo 1: 2093.141 Hz	15.7893002	0.184699998	0.222799997
Modo 2: 3308.25 Hz	34.1645002	0.387999997	2.25869995
Modo 3: 4217.453 Hz	3.0359	10.0778997	28.9124012
Modo 4: 5124.073 Hz	12.7187997	1.98769998	0.88630002

Frecuencia	Participación X	Participación Y	Participación Z
Modo 5: 5243.00 Hz	0.003	53.6167979	6.85200021
Modo 6: 5794.378 Hz	3.92250009	4.97630015	2.01730002
Modo 7: 6348.064 Hz	0.442899996	3.10960002	0.254900008
Modo 8: 7775.773 Hz	0.0802	0.198599999	7.78350011
Modo 9: 8029.572 Hz	0.195599999	0.1834	6.41300008
Modo 10: 8533.848 Hz	0.043300001	1.50730005	0.710899988
Modo 11: 9599.657 Hz	0.276000006	1.67219993	0.0095
Modo 12: 10424.21 Hz	0.219699997	1.64190009	5.2742999
Modo 13: 10918.07 Hz	5.30159995	0.047999999	0.051500002
Modo 14: 12036.42 Hz	0.370500004	0.273600011	3.24480012
Modo 15: 12456.04 Hz	0	0.462500006	2.48709992
Modo 16: 12585.84 Hz	1.62620004	1.61840003	6.55250028
Modo 17: 13358.52 Hz	1.28870001	0.143199996	0.184699998
Modo 18: 14147.28 Hz	1.40850004	0.398000004	5.05019985
Modo 19: 14613.18 Hz	0.773000019	0.431700004	1.35260001
Modo 20: 16009.68 Hz	0.456599984	0.54779998	0.596000021
Modo 21: 16439.73 Hz	0.071300002	6.35910034	4.99060005
Modo 22: 17885.59 Hz	0.524100009	0.0002	0.095299998
Modo 23: 18089.07 Hz	0.0963	0.188700005	0.064899999
Modo 24: 18818.26 Hz	0.071200001	0.227700011	0.0174

Frecuencia	Participación X	Participación Y	Participación Z
Modo 25: 19099.58 Hz	0.529199978	0.131099997	0.380699988
<b>Total de Participación</b>	<b>86.19389954</b>	<b>91.3569986</b>	<b>90.54039979</b>

**Tabla 4.3** – Modos de Vibración del *Knuckle* Delantero con reducciones de peso

Analizando las frecuencias de los 4 casos (pavimento húmedo y seco para la pista corta y larga), mediante la Transformada de Fourier, se puede observar que las frecuencias de mayor impacto de la pista se encuentran entre los 5 y 10 [Hz] (revisar **Anexo E**), lo cual se encuentra muy por debajo de las frecuencias obtenidas en el análisis modal, lo cual nos muestra que, con esta pista, no se tiene riesgo de que el componente entre en resonancia:



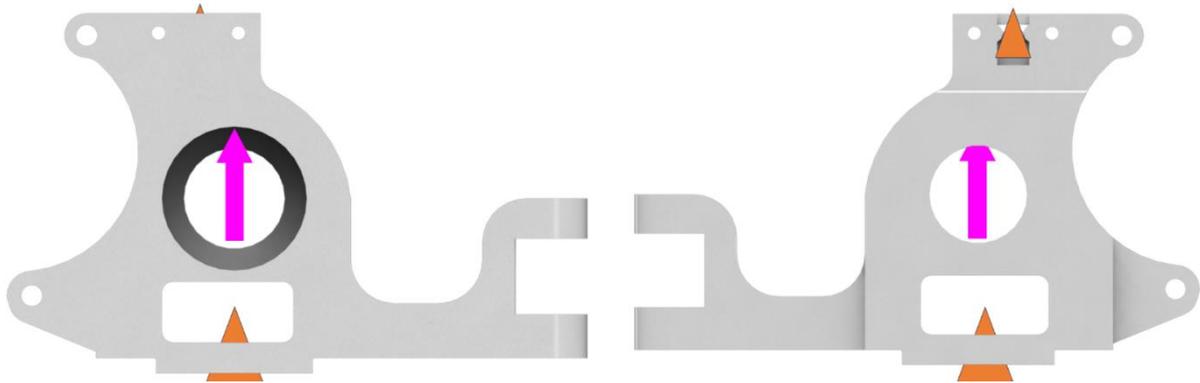
**Figura 4.6** – Gráfica de Frecuencias [Hz] vs. Aceleraciones [m/Hz<sup>2</sup>]

#### IV.II.II. III. Análisis de Fatiga

Para poder realizar el análisis, se debe entender la naturaleza del evento. Si bien para análisis estáticos estructurales se propone la idea de que la llanta funciona como el elemento fijo, mientras el resto del vehículo transmite las

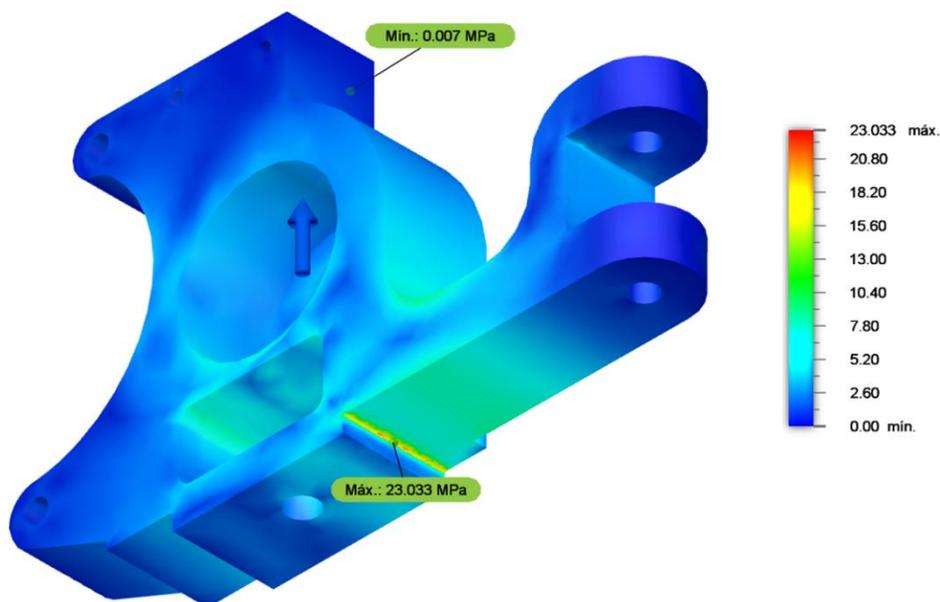
fuerzas al *Knuckle*, en este caso la fuerza principal de interés viene, de hecho, del mismo piso, y es transmitida por la llanta hacia el *Knuckle*.

Por esta razón, la consideración antes mencionada no es aplicable en el caso de la Fatiga. En vez, se propondrá mover nuestra referencia de modo que, ahora, el vehículo es el elemento fijo, mientras la llanta empuja al *Knuckle* en función de la topología del terreno. En términos de CAE, esto se traduce a fijar las sujeciones con el vehículo (Brazo tipo A superior e inferior), mientras se aplica una fuerza vertical en la cara del rodamiento, tal como se observa en la **Figura 4.7**, con la flecha **violeta**:



**Figura 4.7** - Diagrama de Cuerpo Libre del *Knuckle* delantero para Análisis de Fatiga (vista frontal izquierda, vista trasera derecha)

Realizando esto en el software, se obtiene:



**Figura 4.8 – Resultados del Análisis de Fatiga**

Tomando como base la investigación realizada en el **Capítulo II. IV. Fatiga y criterios de vida infinita**, podemos observar que este es un caso de **Fatiga Fluctuante/ Variable**, donde, como se menciona anteriormente, nos conviene usar el Criterio de ASME Elíptico:

$$\left(\frac{S}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{S_m}{S_y}\right)^2 \leq \frac{1}{n^2} \quad (4.1)$$

Donde:

$$S = \text{Esfuerzo Nominal} = \frac{S_{M\acute{a}x} - S_{M\acute{i}n}}{2} = \frac{(23.033 - 0)[MPa]}{2} = 11.5165[MPa]$$

$$S_m = \text{Esfuerzo Promedio} = \frac{S_{M\acute{a}x} + S_{M\acute{i}n}}{2} = \frac{(23.033 + 0)[MPa]}{2} \\ = 11.5165[MPa]$$

$$S_e = 96.5 [MPa]$$

$$S_y = 290 [MPa]$$

$$n = \text{Factor de Seguridad}$$

Sustituyendo:

$$\left(\frac{11.5165[MPa]}{96.5[MPa]}\right)^2 + \left(\frac{11.5165[MPa]}{290[MPa]}\right)^2 \leq \frac{1}{n^2}$$

$$(0.01424) + (0.001577) \leq \frac{1}{n^2}$$

$$n = \sqrt{\frac{1}{(0.01424) + (0.001577)}}$$

$$n = 7.9513$$

Característica	Valor	Característica	Valor
Material	Aluminio 6061 T6	Esfuerzo Mínimo	0.00 [MPa]

Característica	Valor	Característica	Valor
Límite Elástico	290 [MPa]	Factor de Seguridad Mínimo	1.0
Dureza de Fatiga	96.5 [MPa]	Factor de Seguridad	7.9513
Esfuerzo Máximo	23.033 [MPa]	¿Pasa?	Sí

**Tabla 4.4** – Resumen de Resultados del Análisis de Fatiga para el *Knuckle* Delantero

## IV. III. Validaciones Finales del *Knuckle* Trasero

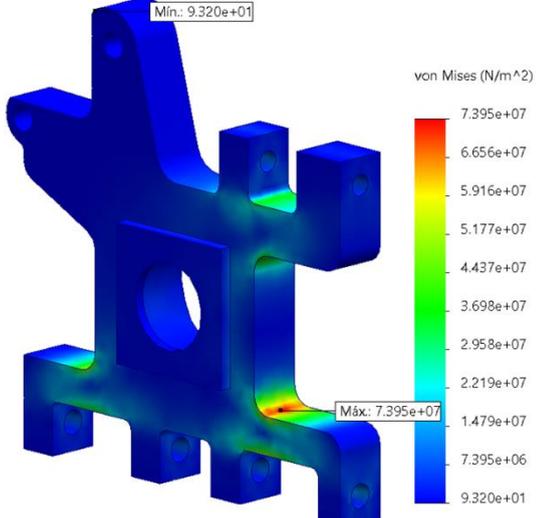
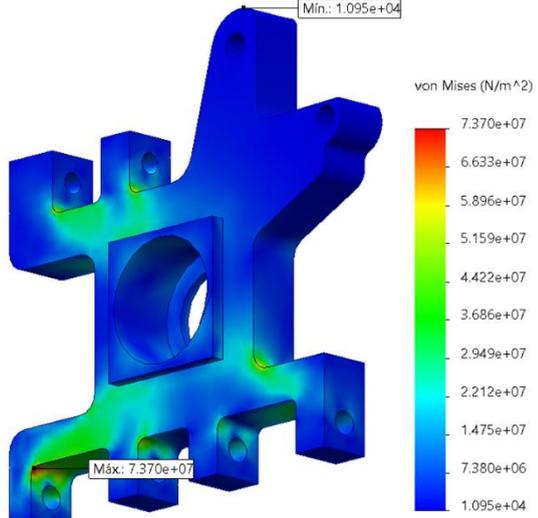
### IV.III. I. Análisis Estáticos

La **Tabla 4.5** corresponde a toda la información general que aplica para los 5 Casos Críticos:

Característica	Valor	Característica	Valor
Material	Aluminio 6061 T6	Factor de Seguridad Mínimo	1.5
Tipo de Malla	Mixto	Criterio de Cedencia	Von Mises
Límite Elástico	290 [MPa]		

**Tabla 4.5** - Características generales de todos los análisis estáticos para los 5 Casos Críticos

La **Tabla 4.2** corresponde al resumen de los resultados obtenidos al realizar los 5 Casos Críticos con el componente ya optimizado (**Figura 3.16**). En la última columna denominada "*Factor de Seguridad*", se calculó el mismo dividiendo el Límite Elástico de 290 megapascales del material usado, entre el Esfuerzo Máximo obtenido (columna 3 de la **Tabla 4.2**), de igual manera en megapascales. El color asignado en la columna de "*Factor de Seguridad*" corresponde a un código de colores en el cual en **Rojo** se marcan aquellos factores de seguridad que no cumplieron con el mínimo planteado en los objetivos de 1.5. En **Verde** se encuentran todos aquellos que si cumplen con dicho factor de seguridad:

Caso Crítico	Resultados de Análisis	Esfuerzo Máximo	Factor de Seguridad
1.- Salto	 <p>Min.: 9.320e+01</p> <p>von Mises (N/m<sup>2</sup>)</p> <p>Máx.: 7.395e+07</p>	73.95 [MPa]	3.92
2.- Curva	 <p>Min.: 1.095e+04</p> <p>von Mises (N/m<sup>2</sup>)</p> <p>Máx.: 7.370e+07</p>	73.7 [MPa]	3.93

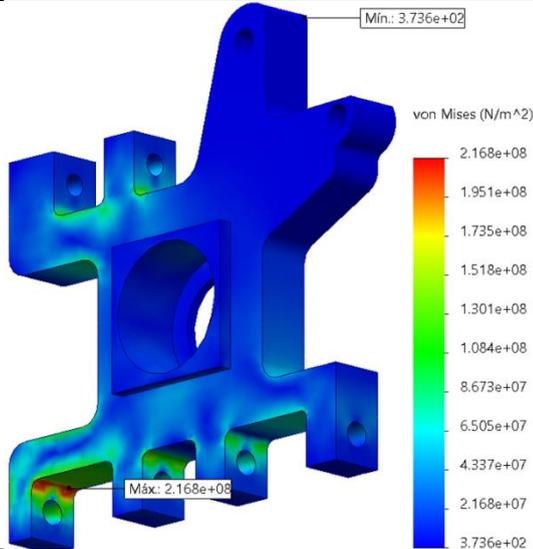
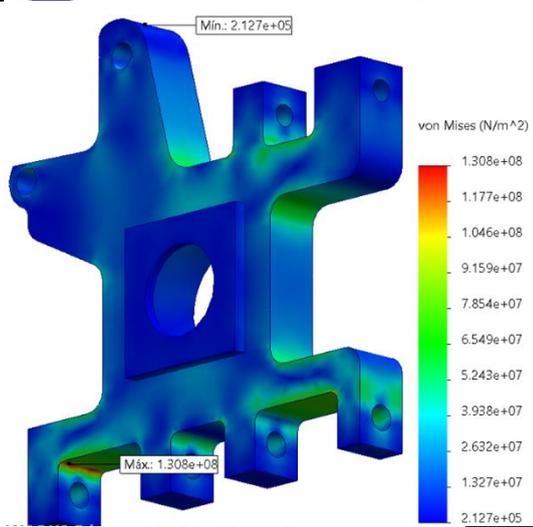
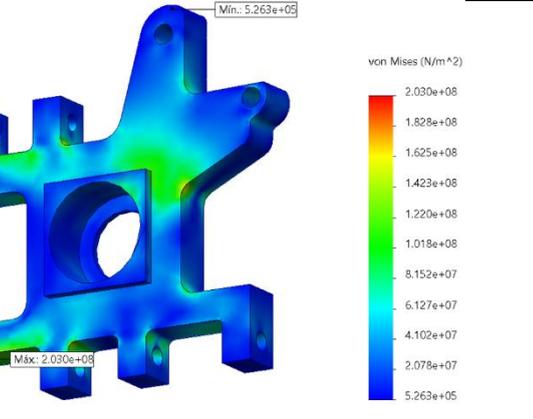
Caso Crítico	Resultados de Análisis	Esfuerzo Máximo	Factor de Seguridad
3.- Bajada		216.8 [MPa]	1.33
4.- Frenado con Impacto		130.8 [Mpa]	2.21
5.- Frenado en Curva		203 [MPa]	1.42

Tabla 4.6 – Resultados de los análisis estáticos para los 5 Casos Críticos

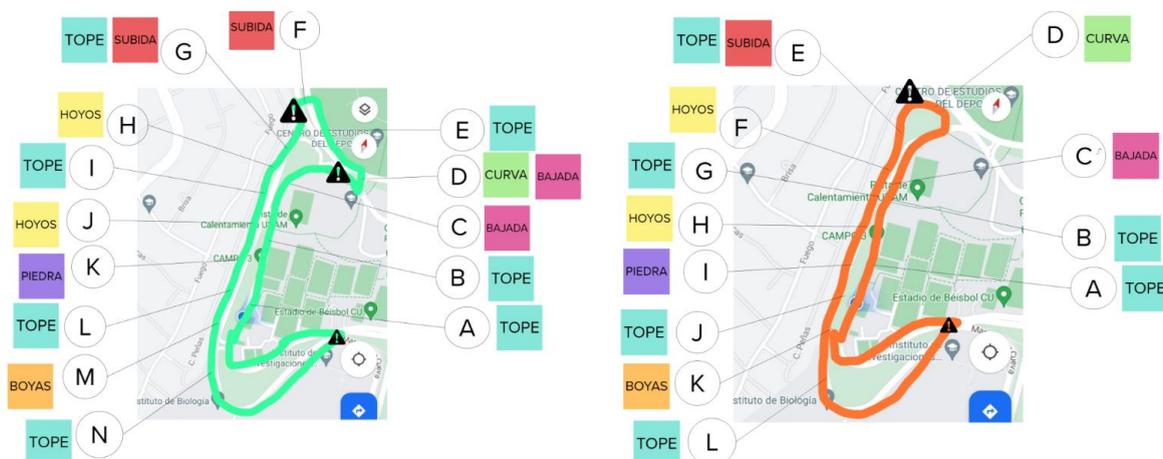
Si bien es cierto que la optimización topológica se realizó en función al Caso Crítico 5 (el cual no pasa el factor de seguridad objetivo de 1.5), esto ocurre por diversas razones que serán explicadas en las conclusiones del presente trabajo.

## IV.III. II. Análisis de Fatiga

### IV.III.II. I. Obtención de Aceleraciones

Retomando lo dicho con el *Knuckle* delantero, debido a la falta de un vehículo tipo Baja SAE® para las pruebas, se usará un vehículo comercial privado para las mismas, las cuales consistirán en seguir las rutas planteadas en la **Figura 4.9** con un elemento colocado al interior del vehículo, cerca de cualquiera de las llantas, que mida las aceleraciones del terreno.

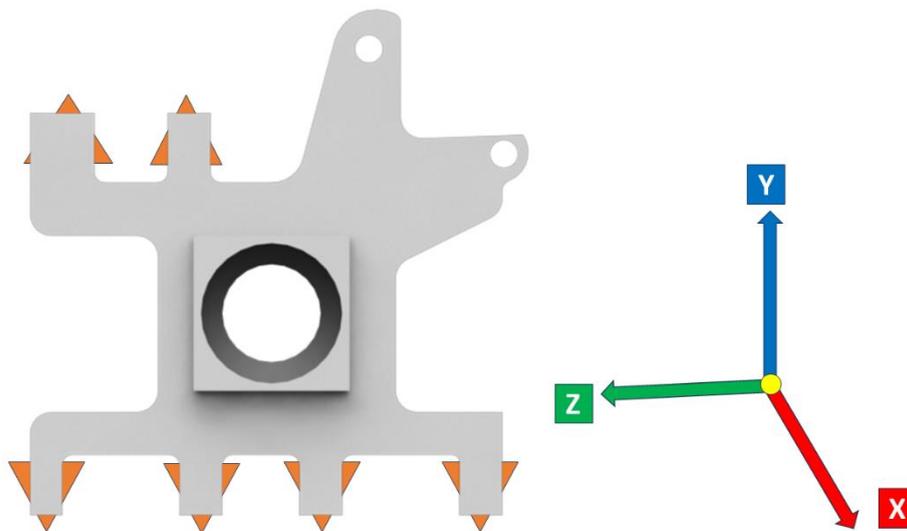
- a) Pista: Estadio de beisbol en C.U.
  - a. Tipo principal de terreno: Pavimento
  - b. Se tienen dos circuitos en el mismo parque (mostradas en la **Figura 4.9**)
  - c. Elementos del terreno:
    - i. Topes
    - ii. Una zona de pocas piedras grandes
    - iii. Una zona con boyas
    - iv. Varias zonas con hoyos
    - v. Zonas donde se debe tener cuidado con el paso de vehículos (marcadas con signo de exclamación)



**Figura 4.9** – Pistas que se pueden generar en *Estadio de Beisbol CU*

## IV.III.II. II. Análisis Modal

Siguiendo la lógica del *Knuckle* delantero, se plantea el Diagrama de Cuerpo Libre del *Knuckle* trasero fijando las conexiones con la suspensión (Brazo Seguidor en las pestañas superiores, Brazo H en las pestañas inferiores):



**Figura 4.10** - Diagrama de Cuerpo Libre del Knuckle Trasero para Análisis Modal

Tras fijar dichas regiones del componente y realizar el análisis, se obtuvieron las siguientes frecuencias:

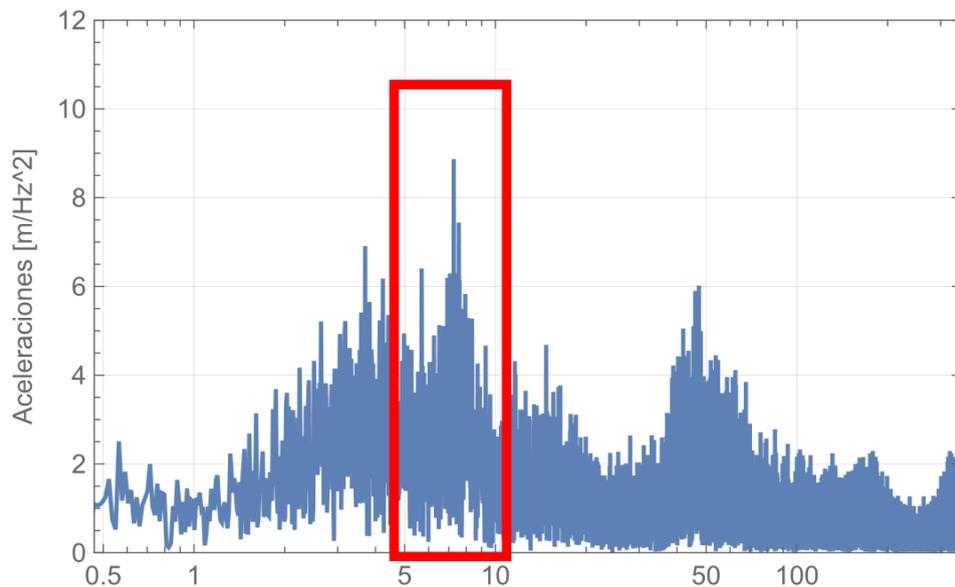
Frecuencia	Participación X	Participación Y	Participación Z
Modo 1: 869.383 Hz	35.3092998	0.0009	0
Modo 2: 2579.97 Hz	2.12200005	0.074799999	0.665100012
Modo 3: 2723.74 Hz	0.066100003	5.45030013	21.4883
Modo 4: 3775.932 Hz	29.9403995	0.082000002	0.0485

Frecuencia	Participación X	Participación Y	Participación Z
Modo 5: 4871.549 Hz	0.054600002	35.0713998	21.8307003
Modo 6: 5560.52 Hz	4.93789986	0.029200001	0.050299999
Modo 7: 6101.741 Hz	0	8.4224999	21.2285995
Modo 8: 6904.70 Hz	3.03199999	0.189399999	0.059900002
Modo 9: 8634.907 Hz	0.306400005	0.0019	0.0097
Modo 10: 9104.402 Hz	0.0302	1.56440008	0.182400004
Modo 11: 9839.437 Hz	0.248300005	0.043399999	4.42029983
Modo 12: 10036.61 Hz	0.274199992	0.0097	11.7012002
Modo 13: 10237.92 Hz	4.30929996	0.0081	0.241199997
Modo 14: 11085.04 Hz	0.448699994	0.0145	0.0004
Modo 15: 11181.43 Hz	0.314499997	0.0072	0
Modo 16: 12173.01 Hz	0.106899999	0.002	0.153100002
Modo 17: 12656.79 Hz	0.044100001	0.0872	0.624499982
Modo 18: 13551.36 Hz	0.111099996	21.4319006	1.42980004
Modo 19: 14069.18 Hz	2.32110005	0.829099957	0.065300002
Modo 20: 14483.06 Hz	0.0072	0.014600001	0.0143
Modo 21: 14532.40 Hz	0.155499997	0.695399987	0.0128
Modo 22: 15193.27 Hz	0.0024	6.72250018	2.46920008
Modo 23: 15360.23 Hz	0.0007	0.318800006	0.039599999
Modo 24: 15746.76 Hz	0.166099996	0.019799999	0.0001

Frecuencia	Participación X	Participación Y	Participación Z
Modo 25: 16236.93 Hz	0.66010002	0.043799999	0
<b>Total de Participación</b>	<b>83.9842992</b>	<b>73.3345005</b>	<b>84.2135999</b>

**Tabla 4.7** – Modos de Vibración del Knuckle Trasero con reducciones de peso

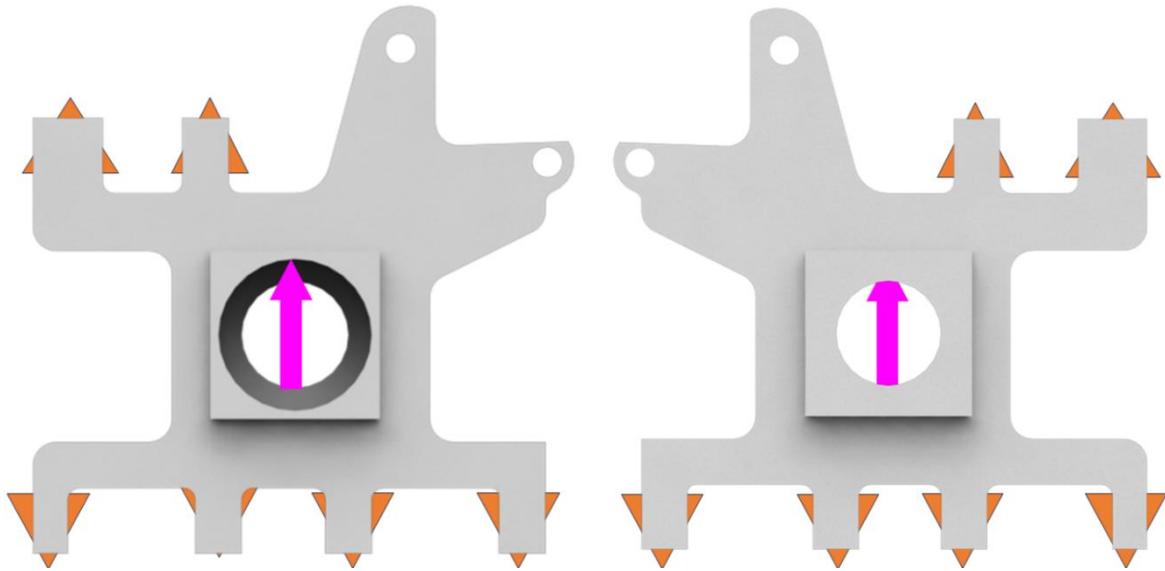
Analizando las frecuencias de los 4 casos (pavimento húmedo y seco para la pista corta y larga), mediante la Transformada de Fourier, se puede observar que las frecuencias de mayor impacto de la pista se encuentran entre los 5 y 10 [Hz] (revisar **Anexo E**), lo cual se encuentra muy por debajo de las frecuencias obtenidas en el análisis modal, lo cual nos muestra que, con esta pista, no se tiene riesgo de que el componente entre en resonancia:



**Figura 4.11** – Gráfica de Frecuencias [Hz] vs. Aceleraciones [m/Hz<sup>2</sup>]

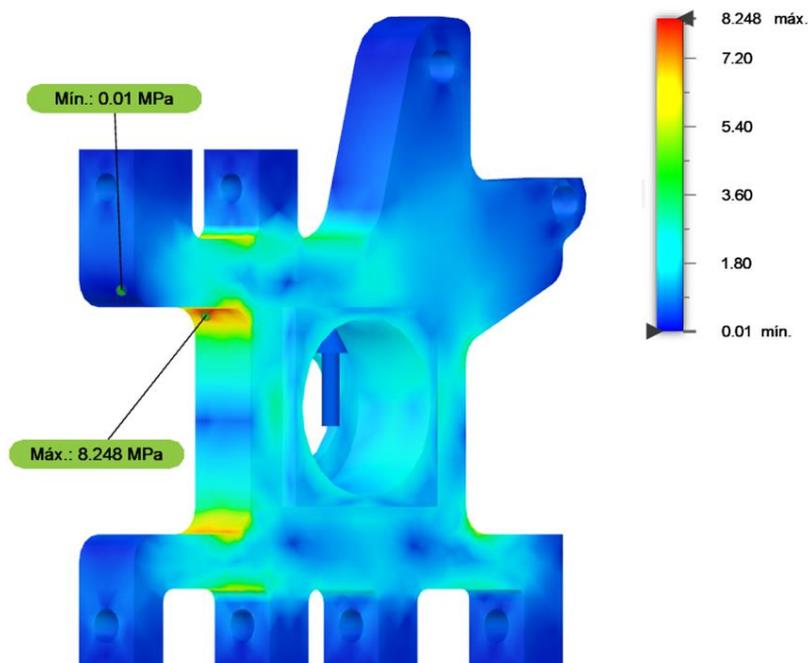
#### IV.III.II. III. Análisis de Fatiga

Retomando la lógica del *Knuckle* delantero, se fijan las pestañas que conectan a la suspensión, y se coloca la fuerza en el barreno del rodamiento, así como se observa en la **Figura 4.12**:



**Figura 4.12** - Diagrama de Cuerpo Libre del Knuckle Trasero para Análisis de Fatiga (vista frontal a la izquierda y vista trasera a la derecha)

Pasando esta información al software se tiene:



**Figura 4.13** - Resultados del Análisis de Fatiga

Usando el Criterio de ASME Elíptico:

$$\left(\frac{S}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{S_m}{S_y}\right)^2 \leq \frac{1}{n^2}$$

Donde:

$$S = \text{Esfuerzo Nominal} = \frac{S_{M\acute{a}x} - S_{M\acute{i}n}}{2} = \frac{(8.248 - 0)[MPa]}{2} = 4.124 [MPa]$$

$$S_m = \text{Esfuerzo Promedio} = \frac{S_{M\acute{a}x} + S_{M\acute{i}n}}{2} = \frac{(8.248 + 0)[MPa]}{2} = 4.124 [MPa]$$

$$S_e = 96.5 [MPa]$$

$$S_y = 290 [MPa]$$

$$n = \text{Factor de Seguridad}$$

Sustituyendo:

$$\left(\frac{4.124[MPa]}{96.5[MPa]}\right)^2 + \left(\frac{4.124[MPa]}{290[MPa]}\right)^2 \leq \frac{1}{n^2}$$

$$0.001826 + 0.0002022 \leq \frac{1}{n^2}$$

$$n = \sqrt{\frac{1}{0.001826 + 0.0002022}}$$

$$n = 22.2045$$

Característica	Valor	Característica	Valor
Material	Aluminio 6061 T6	Esfuerzo Mínimo	0.00 [MPa]

Característica	Valor	Característica	Valor
Límite Elástico	290 [MPa]	Factor de Seguridad Mínimo	1.0
Dureza de Fatiga	96.5 [MPa]	Factor de Seguridad	22.2045
Esfuerzo Máximo	8.248 [MPa]	¿Pasa?	Sí

**Tabla 4.8** – Resumen de Resultados del Análisis de Fatiga para el Knuckle Trasero

# Capítulo V. Conclusiones

## V. I. Conclusiones

Objetivo	Knuckle Delantero			Knuckle Trasero		
	Objetivo	Resultado	¿Pasa?	Objetivo	Resultado	¿Pasa?
Reducir el Peso de los Knuckles	Mínimo 1.812 [Kg] (Que pese menos de 2.915 [Kg])	Se redujeron 3.096 [Kg] (Pesa 1.631 [Kg])	Sí	Mínimo 1.894 [Kg] (Que pese menos de 2.006 [Kg])	Se redujeron 2.043 [Kg] (Pesa 1.857 [Kg])	Sí
Factor de Seguridad Mínimo en Análisis Estáticos	1.5	1.35	No	1.5	1.33	No
Factor de Seguridad Mínimo de vida infinita en Análisis de Fatiga	1.0 ( <i>Vida Infinita</i> )	7.9513	Sí	1.0 ( <i>Vida Infinita</i> )	22.2045	Sí
Knuckle Manufacturable	Lista de pasos generales de Manufactura	Anexo D.I	Sí	Lista de pasos generales de Manufactura	Anexo D.II	Sí

**Tabla 5.1** – Resumen de Objetivos y Requerimientos de la Tesis

De manera general, se puede concluir que el trabajo cumplió su función de reducir el peso de los Knuckles, validando que dicha reducción no afecta el funcionamiento de estos ni en fatiga, ni en casos de falla última. Además, se propuso la manera en la que se pueden manufacturar, lo cual es importante puesto que, a pesar de que en CAD es fácil generar geometrías complejas para reducir peso y aumentar resistencia, manufacturar geometrías específicas en físico puede llegar a ser muy complicado, o incluso imposible.

Hablando en particular de cada objetivo, el primer objetivo *Reducir el peso de los Knuckles* se obtuvo en el delantero reduciendo de 4.727 [Kg] a 1.631 [Kg], y en el trasero de 3.9 [Kg] a 2.043 [Kg] lo cual confirma lo mencionado al inicio del documento de los *Knuckles* estando sobre diseñados.

El segundo y tercer objetivos corresponden a la validación teórica del componente, de los cuales el tercer objetivo se cumplió, al igual que el primero, sin mayor problema (Factor de Seguridad mayor a 7 para el Knuckle Delantero, y mayor a 22 para el Knuckle Trasero). Esto representa un sobre diseño en términos de fatiga debido a que los Knuckles son los componentes que se rediseñan o modifican cada temporada. En promedio, una temporada abarca un año completo, y consiste en, máximo, 2 competencias completas y pruebas realizadas antes y después de las mismas (eso, si no es sólo 1 competencia en toda la temporada), por lo cual buscar vida infinita para los componentes puede ser bastante innecesario, pero eso se dejará para futuros trabajos.

Finalmente, en el caso del segundo objetivo, si bien numéricamente no se cumple el objetivo de 1.5, se toma como válido debido a la limitante planteada en el proceso iterativo de realizar el proceso máximo 5 veces buscando un factor de seguridad mínimo de 1.3. Además, es importante enfatizar dos problemas que se tienen con el proceso realizado para la optimización topológica:

- El primero es, debido a que el software para la optimización topológica y el software de diseño del componente son diferentes, el material removido en el CAD es sólo una aproximación visual a los resultados mostrados por la optimización, ya que este último no proporciona medidas exactas. Además, la geometría resultante de la optimización se puede observar que es totalmente irregular, algo que no sería realista diseñar en un componente a manufacturar por estudiantes, por lo cual se hacen las adecuaciones necesarias en el CAD.
- Segundo, si bien los Casos Críticos provienen de situaciones realistas, los cálculos realizados para las fuerzas a usar sobre el *Knuckle* corresponden, en su totalidad, a valores máximos, y la probabilidad de que ocurra un evento con todas esas características maximizadas, es muy baja. Es aquí, donde viene la importancia de implementar un análisis más realista como lo fue el Análisis de Fatiga, el cual nos muestra, en contraste con los análisis estáticos, *Knuckles* sobre diseñados para un uso constante bajo cargas de mucha mayor probabilidad de ocurrencia.

# Capítulo VI. Bibliografía y Cibergrafía

## consultada

### *VI. I. Bibliografía y Cibergrafía consultada*

1. Jose50. Que es la masa no suspendida y cómo afecta al vehículo. *Club Seat Tarraco* 1–1 <https://www.clubseattarraco.com/threads/que-es-la-masa-no-suspendida-y-como-afecta-al-vehiculo.1750/> (2021).
2. Grumeber. Tipos de aluminio y aplicaciones ¿Cuál emplear en cada caso? *Grumeber* 1–1 <https://grumeber.com/tipos-de-aluminio-cual-usar-en-cada-caso/> (2022).
3. Shinde, P., Jirage, R. & Garde, K. Design and optimization of hub and knuckle for Formula SAE Car. (2015) doi:10.13140/RG.2.1.2262.8962.
4. Abad Padilla-Padilla, C. I., Rodolfo Pozo-Safla, E. I., Roberto Ballin-Juna III, F. & Paul Herrera-Santamaría, D. I. Optimización topológica de las manguetas delanteras y posteriores para un vehículo prototipo fórmula SAE Optimización topológica de las manguetas delanteras y posteriores para un vehículo prototipo fórmula SAE Topological optimization of front and rear stub axles for a SAE formula prototype vehicle Otimização topológica de eixos dianteiros e traseiros para um veículo protótipo de fórmula SAE. **6**, 984–1005.
5. *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ.* (2022).
6. Manso Agundez, J. *Análisis y Optimización Topológica de Un Chasis Para Formula Student.*
7. De, C. & Automotriz, I. *ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE MECÁNICA 'REDISEÑO MECÁNICO CON OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE LAS MANGUETAS PARA EL PROTOTIPO FÓRMULA SAE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ'.*
8. Sandvik Coromant. Manguetas. *Sandvik Coromant* <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/industry-solutions/automotive/components/knuckles>.

9. Granell Heredero, I., Carnicero, A. & Madrid, L. *ESCUELA (TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA ICAI) Diseño de Las Manguetas de La Suspensión Para Un Prototipo de FSAE*. (2018).
10. Blancarte, J. & Buchsbaum, J. A. ¿Cuáles son los tipos de suspensión más comunes? *Autocosmos* 1–1 <https://noticias.autocosmos.com.mx/2013/08/23/cuales-son-los-tipos-de-suspension-mas-comunes> (2023).
11. Sarahi, A., Trejo Sánchez, X., En, M., Osiris, I. & Torres, R. *Que Para Obtener El Título de UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA*.
12. SpeeDee Pachuca. Sistema de suspensión, cómo funciona y cuáles son sus componentes. *SpeeDee* 1–1 <https://speedee.mx/sistema-de-suspension/#:~:text=La%20suspensi%C3%B3n%20de%20doble%20horquilla%20consta%20de%20dos%20brazos%20en,altas%20velocidades%20y%20curvas%20r%C3%A1pidas>. (2022).
13. Automotive Engineering, A. Collegiate Design Series Baja SAE Rules. 1–139 (2024).
14. Dusane, S. V., Dipke, M. K. & Kumbhalkar, M. A. Analysis of Steering Knuckle of All Terrain Vehicles (ATV) Using Finite Element Analysis. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* vol. 149 (Institute of Physics Publishing, 2016).
15. Deshpande, A., Ekabote, N., Sridhar, A. S. & Vernekar, A. Design cycle implementation on a customized steering knuckle for a competition ATV. in *Journal of Physics: Conference Series* vol. 1706 (IOP Publishing Ltd, 2020).
16. karlossantiuste. ERM: 2.2. Criterios de fallo . [https://www.youtube.com/watch?v=IJ\\_ZSXMxaFY](https://www.youtube.com/watch?v=IJ_ZSXMxaFY) (2016).
17. karlossantiuste. ERM: 2.3. Ejemplo de aplicación criterios de fallo . <https://www.youtube.com/watch?v=nMT8ArYmbXs> (2016).
18. Mirlisenna, G. ¿Qué es el método de elementos finitos y cómo es utilizado en la simulación? *ESSS* <https://www.esss.com/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/> (2022).
19. César, M. I. & Estrada, A. L. *Dinámica de Multicuerpos Rígidos Libres y Forzados Fundamentos de Vibroacústica Para El Diseño*.
20. Solidworks. 2018 SolidWorks - Modelo isotrópico elástico lineal.
21. Luna Estrada, C. A. Optimización estructural evolutiva de un exoesqueleto de miembros pélvicos. (Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, 2016).

22. Ortiz Prado Osvaldo Ruiz Cervantes Juan Armando Ortiz Valera, A. *MODELADO DE PROCESOS DE MANUFACTURA*. (2013).
23. Análisis modal. <https://www.ptc.com/es/technologies/cad/simulation-and-analysis/modal-analysis> (2023).
24. Catec. Análisis Modal . <https://www.catec.aero/es/materiales-y-procesos/l%C3%ADnea-de-investigaci%C3%B3n/an%C3%A1lisis-modal>.
25. Siemens Digital Industries Software. Modal analysis. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/modal-analysis/1317>.
26. Ing. Gutiérrez Calzada, D. *SISTEMAS DE MÚLTIPLES GRADOS DE LIBERTAD. ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL*. (2018).
27. Capítulo 5. Análisis Modal. *Universidad de Sevilla* 51–62 <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3828/fichero/Cap%C3%ADtulos%252F5+An%C3%A1lisis+modal.pdf>.
28. *CAPITULO V 5.1 Historia Del Análisis Modal*. [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/vera\\_c\\_r/capitulo5.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/vera_c_r/capitulo5.pdf).
29. ESSS. MÉTODOS Y TÉCNICAS PARA LA OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL DE PROYECTOS. *ESSS* 1–1 <https://www.esss.com/es/blog/metodos-y-tecnicas-para-la-optimizacion-estructural-de-proyectos/> (2024).
30. En, M. *et al.* *LA OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL Y SUS APLICACIONES*.
31. Tsavdaridis, K. D., Kingman, J. J. & Toropov, V. V. Application of structural topology optimisation to perforated steel beams. *Comput Struct* **158**, 108–123 (2015).
32. SIMULEXA. Explorando la Optimización Topológica y Paramétrica: Diseñando para la Eficiencia. *SIMULEXA* 1–1 [https://www.simulexa.com/es\\_es/explorando-la-optimizacion-topologica-y-parametrica-disenando-para-la-eficiencia/](https://www.simulexa.com/es_es/explorando-la-optimizacion-topologica-y-parametrica-disenando-para-la-eficiencia/) (2023).
33. Tan, C. & Romero, A. . . *INTRODUCCIÓN Una Metodología General Para La Optimización Paramétrica de Un Controlador de Estructura Predeterminada En Matlab-Simulink A General Methodology for the Parametric Optimization of a Predetermined Structure Controller in Matlab-Simulink*. *REVISTA INGENIERÍA UC* vol. 10 (2003).
34. Jordi Nadal Estivill. *OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA Y PARAMÉTRICA DE UNA CARROCERÍA DE AUTOMÓVIL PARA ESCENARIOS DE RIGIDEZ Y VIBRACIÓN*. (Comillas Universidad Pontificia ICAI, Madrid, 2022).

35. AUTODESK Fusion. Estudio de optimización de formas. *AUTODESK Fusion* 1–1 <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ESP/?guid=SIM-SHAPE-OPTIMIZATION>.
36. De Estructuras, D., Construcción, Y. & Nicolás, M. V. *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA 'OPTIMIZACIÓN DE FORMA Y TOPOLOGÍA CON MALLA FIJA Y ALGORITMOS GENÉTICOS'*. (2006).
37. AUTODESK Fusion. Criterios de optimización de formas. *AUTODESK Fusion* 1–1 <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ESP/?guid=SIM-SO-CRITERIA-CONCEPT>.
38. Prat, P. *Pere Prat Ecuaciones Constitutivas ELASTICIDAD y PLASTICIDAD*.
39. José Carlos Bellido Alberto Donoso, por. *Optimización Estructural y Diseño de Materiales: Una Incursión Matemática En Ingeniería*. vol. 16 (2013).
40. *ESTUDIO COMPUTACIONAL DE MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS MULTICRITERIO IMPRECISOS AUTOR: JOSÉ FRANCISCO BLANCO AGUDO TUTORES: ALFONSO MATEOS CABALLERO ANTONIO JIMÉNEZ MARTÍN*.
41. Torres, I. Diagrama de Flujo, una herramienta infalible para visualizar, esquematizar y mejorar tus procesos. *IVE Consultores* 1–1 <https://iveconsultores.com/diagrama-de-flujo/> (2019).
42. César, M. I. & Estrada, A. L. *Mecánica de Vibraciones Del Medio Continuo Fundamentos de Vibroacústica Para El Diseño*.
43. AutoFEM. Análisis de fatiga. [https://autofem.com/help/es/fatigue\\_analysis.html](https://autofem.com/help/es/fatigue_analysis.html).
44. Solidworks. Análisis de fatiga - 2021 - Ayuda de SOLIDWORKS. 1–1 [https://help.solidworks.com/2021/spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Fatigue\\_Analysis.htm](https://help.solidworks.com/2021/spanish/SolidWorks/cworks/c_Fatigue_Analysis.htm) (2021).
45. IBERISA. Introducción al Análisis de Fatiga o Durabilidad. 1–1 <http://www.iberisa.com/soporte/fatiga/intro.htm#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20de%20fatiga%20estructural,conocidas%20como%20cargas%20de%20servicio>.
46. Rao, S. S. *Vibraciones Mecánicas*. (PEARSON EDUCACIÓN, CDMX, 2012).
47. Ekeeda. Gerber's Criteria - Theories of Elastic Failure - Strength of Materials . <https://www.youtube.com/watch?v=Lf9svFB6m6w> (2016).
48. Ekeeda. Soderberg's Criteria - Theories of Elastic Failure - Strength of Materials . <https://www.youtube.com/watch?v=ZPvFWIJLkA> (2016).
49. Ekeeda. Goodman's Criteria - Theories of Elastic Failure - Strength of Materials . 1–1 <https://www.youtube.com/watch?v=EbVTFIjw46c> (2016).

50. Ekeeda. Methods for Reducing Stress Concentration - Theories of Elastic Failure - Strength of Materials . 1–1 <https://www.youtube.com/watch?v=yQGiwsHQab8> (2016).
51. Ekeeda. Stress Concentration Factor - Theories of Elastic Failure. 1–1 <https://www.youtube.com/watch?v=2J3hwiEQ38> (2016).

# **Anexo A: Protocolo de Pruebas Físicas**

## **para un vehículo tipo Baja**

### ***A. I. Propósito del Protocolo de Pruebas Físicas***

#### ***para un vehículo tipo Baja***

El propósito de este protocolo es el de estandarizar y documentar el proceso de experimentación para la obtención de aceleraciones del vehículo de Baja SAE® Puma Off Road Team en una pista de pruebas diseñada por el equipo.

### ***A. II. Materiales e Instrumentación***

#### ***A.II. I. Infraestructura e Instalaciones***

- Lugar para pista:
  - Parque “Las Maravillas”
  - Ciudad Universitaria – Pista “Jardín Botánico”
  - Parque Ejidal San Nicolás Totolapan, Ajusco
- Vehículo monoplaza todo terreno del equipo Baja SAE® Puma Off Road Team

#### ***A.II. II. Equipo necesario para las pruebas***

- Vehículo monoplaza todo terreno de Baja SAE® Puma Off Road Team

- Pilotos
- Equipo de Seguridad de Pilotos
  - Neck
  - Casco
  - Traje de Piloto
  - Zapato cerrado (zapatos, tenis, converse)
  - Tear offs
- Equipo de Seguridad al Vehículo
  - Extintor
  - Hands
  - Cinturones
- Una bandera verde
- Dos banderas rojas
- Cuatro Cronómetros
- Inflador de Neumáticos eléctrico
- Consumibles
  - Gasolina
  - Líquido de Frenos
  - Grasa para Rodamientos
  - Sellador para Neumáticos
  - Cinchos
  - Aceite para Reductor
- Repuestos
  - A selección de los sistemas
- Sistema de adquisición de datos (Acelerómetros y ECU)
- Software para análisis de datos (Matlab® o Mathematica®)
- Software de análisis por elemento finito (Ansys® o Hyperworks®)

## *A.II. III. Instrumentación*

A seleccionar y organizar con el apoyo del Sistema de Instrumentación y Adquisición de Datos.

## ***A. III. Condiciones de Seguridad***

### ***A.III. I. Acciones a realizar***

- a) Todos los integrantes deberán permanecer fuera del área que corresponda a la pista
- b) Deberá haber por lo menos un integrante con celular a la mano en cada región asignada a lo largo de las pistas en caso de que el vehículo se descomponga y se requiera llamar a los demás integrantes
- c) Revisión rutinaria después de cada prueba

### ***A.III. II. Elementos a tener presente durante las pruebas***

- a) 1 extintor dentro del vehículo
- b) 1 extintor fuera del vehículo
- c) Por lo menos un integrante de cada sistema presente durante las pruebas en caso de que falle algún componente
- d) Botiquín de primeros auxilios
- e) Equipo de piloto
  - a. Neck
  - b. Casco
  - c. Traje de Piloto
  - d. Zapato cerrado
  - e. Muñequeras
  - f. Lentes para Piloto
  - g. Tear offs

### *A.III. III. Condiciones que el vehículo debe cumplir*

- a) El vehículo debe cumplir con el reglamento Baja SAE® correspondiente
- b) El sistema de frenos del vehículo debe ser funcional
- c) La luz de frenos debe activarse correctamente
- d) Los kill switch deben funcionar correctamente

## *A. IV. Descripción de la Prueba*

### *A.IV. I. Prueba de Aceleración*

Se realizarán 3 pruebas para cada una de las siguientes situaciones:

- De 0 a máxima velocidad
- Sujeto a camioneta de 1 [ton]
- 4 acelerómetros (uno en cada *Knuckle*)
- Presión de llantas de 5, 10, 15, 20, 25 [psi]
- 100 [m] Terreno de tierra, 100 [m] terreno con pasto, 100 [m] terreno empedrado, 100 [m] terreno pavimentado
- Configuración: 4WD y RWD
- Todos los posibles pilotos

### *A.IV. II. Prueba de Pendiente Subida*

Se realizarán 3 pruebas para cada una de las siguientes situaciones:

- Vehículo va de bajada a la pendiente
- De 0 a máxima velocidad
- 4 acelerómetros (uno en cada *Knuckle*)

- Presión de llantas de 5, 10, 15, 20, 25 [psi]
- Configuración: 4WD y RWD
- Todos los posibles pilotos

### *A.IV. III. Prueba de Pendiente Bajada*

Se realizarán 3 pruebas para cada una de las siguientes situaciones:

- Vehículo va de bajada a la pendiente
- De 0 a máxima velocidad
- 4 acelerómetros (uno en cada *Knuckle*)
- Presión de llantas de 5, 10, 15, 20, 25 [psi]
- Configuración: 4WD y RWD
- Todos los posibles pilotos

### *A.IV. IV. Prueba de Arrastre*

Se realizarán 3 pruebas para cada una de las siguientes situaciones:

- De 0 a máxima velocidad
- Sujeto a camioneta de 1 [ton]
- 4 acelerómetros (uno en cada *Knuckle*)
- Presión de llantas de 5, 10, 15, 20, 25 [psi]
- 100 [m] Terreno de tierra, 100 [m] terreno con pasto, 100 [m] terreno empedrado, 100 [m] terreno pavimentado
- Configuración: 4WD y RWD
- Todos los posibles pilotos

### *A.IV. V. Prueba de Endurance*

Se realizarán 3 pruebas para cada una de las siguientes situaciones:

- Rectas 25 [Km/h], curvas a 20 [Km/h]
- 3 vueltas
- 4 acelerómetros (uno en cada Knuckle)
- Presión de llantas de 5, 8, 10, 13, 15, 17, 20 [psi]
- Configuración: 4WD y RWD
- Todos los posibles pilotos

## ***A. V. Preparaciones previas a las pruebas***

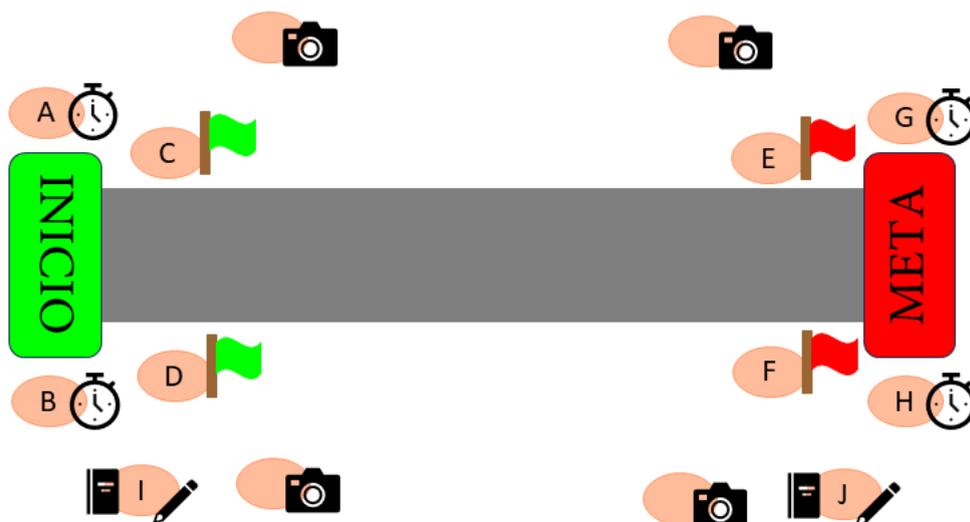
**Nota:** *En caso de no contar con 100 [m], hacer la prueba de Aceleración con 10 [m], y de ahí ir aumentando la longitud de la pista por 10 [m] hasta encontrar una distancia a la cual el vehículo llegue a su velocidad máxima, y usar esa longitud para todas las pruebas.*

### ***A.V. I. Preparación de la pista A:***

Se le conocerá como **pista A**, a todas aquellas que sean en línea recta donde la gente al inicio de la pista pueda ver a la gente al final de la misma, como se observa en la **Figura A.1**.

- Delimitar el inicio de la pista con cinta
- Medir 100 [m] en línea recta
- Marcar el final de la pista con cinta
- Colocar dos integrantes al inicio: uno al lado izquierdo de la pista, y otro al lado derecho (integrantes A y B en la **Figura A.1**), y dos al final de la pista: uno al lado izquierdo y otro al lado derecho (integrantes G y H en la **Figura A.1**)
- Cada integrante debe de contar con un cronómetro para tomar el tiempo que tarda el vehículo en cruzar la línea de meta
- Colocar dos integrantes al inicio: uno al lado izquierdo de la pista, y otro al lado derecho (integrantes C y D en la **Figura A.1**), y dos al final de la pista: uno al lado izquierdo y otro al lado derecho (integrantes E y F en la **Figura A.1**)
- Darle una bandera verde a cada integrante al inicio, y una bandera roja a cada integrante al final de la pista

- h) Colocar un integrante con el **Formato de Recolección de Datos** al inicio, y otro al final de la pista (integrantes I y J en la **Figura A.1**)
- i) En caso de tener la cantidad de personas suficientes, colocar dos personas con cámara o celular, a grabar desde el inicio de la pista, hasta la mitad, y dos personas a grabar desde la mitad de la pista, hasta el final, como se observa en la **Figura A.1**:



**Figura A.1** – Alineación para **Pista A**

## *A.V. II. Preparación de la pista B:*

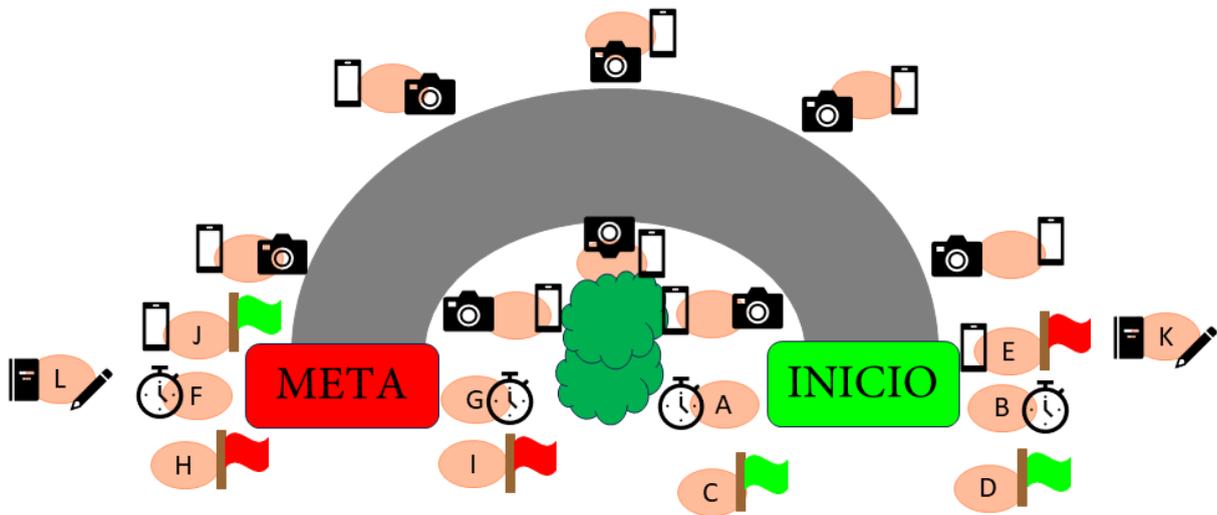
Pista Se le conocerá como **pista B**, a todas aquellas donde la gente al inicio de la pista no pueda ver a la gente al final de la misma, principalmente abarcando lo que son curvas y/o desniveles, como se observa en la **Figura A.2**.

- a) Delimitar el inicio de la pista con cinta
- b) Marcar el final de la pista con cinta
- c) Colocar dos integrantes al inicio: uno al lado izquierdo de la pista, y otro al lado derecho (integrantes A y B en la **Figura A.2**), y dos al final de la pista: uno al lado izquierdo y otro al lado derecho (integrantes F y G en la **Figura A.2**)

- d) Cada integrante debe de contar con un cronómetro para tomar el tiempo que tarda el vehículo en cruzar la línea de meta
- e) Colocar dos integrantes al inicio: uno al lado izquierdo de la pista, y otro al lado derecho (integrantes C y D en la **Figura A.2**), y dos al final de la pista: uno al lado izquierdo y otro al lado derecho (integrantes H e I en la **Figura A.2**)
- f) Darle una bandera verde a cada integrante al inicio, y una bandera roja a cada integrante al final de la pista
- g) Colocar un integrante al inicio (integrante E), ya sea del lado izquierdo o derecho, donde haya mejor espacio y vista, y otro al final (integrante J)
- h) El integrante E contará con una bandera verde y un celular/ medio de comunicación con el integrante J, y el integrante J con una bandera roja y un celular/ medio de comunicación con el integrante E
  - a. El objetivo de esto es que, en cuanto el vehículo empiece la prueba, el integrante E le comunicará esto al integrante J, quien hará uso de la bandera para que los integrantes F y G (con los cronómetros) empiecen a medir el tiempo
  - b. En cuanto el vehículo cruce la línea de meta, el integrante J le comunicará esto al integrante E, quien hará uso de la bandera para que los integrantes A y B (con los cronómetros), puedan finalizar la medición del tiempo
- i) Colocar un integrante con el **Formato de Recolección de Datos** al inicio, y otro al final de la pista (integrantes I y J en la **Figura A.2**)
- j) En caso de tener la cantidad de personas suficientes, colocar dos personas con cámara o celular, a grabar desde el inicio de la pista y dos personas a grabar el final de la pista. Además, colocar suficientes cámaras a lo largo de la pista (tanto de lado izquierdo como derecho del piloto) para poder cubrir toda la pista como se observa en la **Figura A.2**.
- k) Las personas con cámaras deberán contar con un celular con el cual estarán en contacto con las personas J y E, de manera que todas las grabaciones empiecen y terminen “al mismo tiempo”, o lo más cercano posible. La importancia de esto, es hacer una posterior correlación entre las aceleraciones que se midieron, y poder ver qué estaba

pasando físicamente con el vehículo (ejemplo, se observa que en el segundo 2 hay un pico en las aceleraciones, se recurre a las grabaciones para observar si hay algún elemento físico, como una piedra, que haya ocasionado ese pico, o si el pico fue un error de medición)

- l) Las grabaciones del vehículo servirán para obtener aun mayor información del vehículo como la compresión de los amortiguadores, o realizar un análisis ergonómico del vehículo.



**Figura A.2 – Alineación para Pista B**

### *A.V. III. Preparación de la pista C:*

- a) Marcar la META con cinta (al ser un circuito cerrado, la META será el inicio y final de la pista)
- b) Seleccionar las pruebas con las que se armará la pista siguiendo los pasos mostrados en el **Anexo B. Ejemplo de Creación de una pista**
- c) Diseñar la pista basándonos en la prueba seleccionada de la siguiente manera:

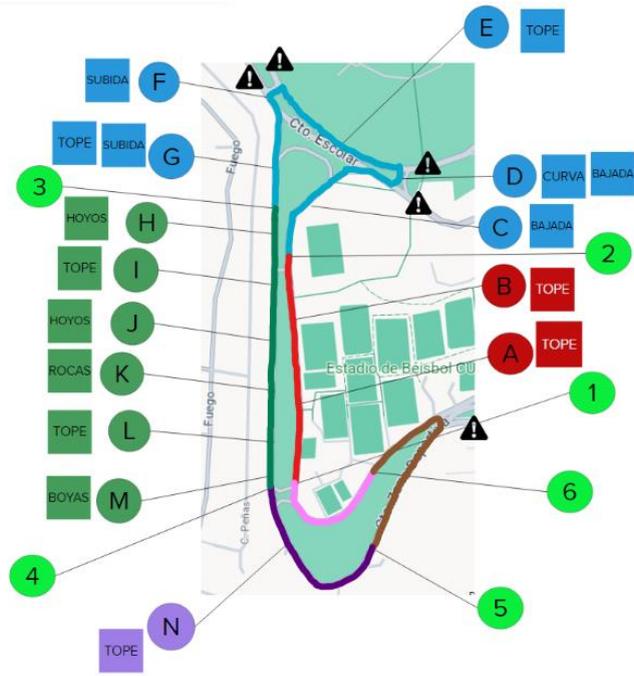


Figura A.3 – Ejemplo de diseño de pista usando la pista “Jardín Botánico” en C.U.

PRUEBAS	REGIÓN QUE ABARCA	COLOR DE LA REGIÓN	ELEMENTOS NATURALES DE LA PISTA	ELEMENTOS EXTERNOS PARA LA PRUEBA
SUSPENSIÓN	INICIO: Punto 1 FIN: Punto 2	ROJO	2 Topes	Rampas, Liantas
MANIOBRABILIDAD	INICIO: Punto 2 FIN: Punto 3	AZUL	Bajadas, Subidas, Curvas y 2 Topes	Conos, Liantas
SUSPENSIÓN	INICIO: Punto 3 FIN: Punto 4	VERDE	2 Hoyos, 2 Topes, 1 Roca y 1 Zona de Bolas Metálicas	Rampas, Liantas
MANIOBRABILIDAD	INICIO: Punto 4 FIN: Punto 5	MORADO	1 Tope	Conos, Liantas
ARRASTRE	INICIO: Punto 5 FIN: Punto 6	CAFÉ	Nada	2 Camionetas
MANIOBRABILIDAD	INICIO: Punto 6 FIN: Punto 1	ROSA	Nada	Conos, Liantas

Figura A.4 – Descripción del ejemplo de diseño de pista usando la pista “Jardín Botánico” en C.U

Donde las zonas Rojo y Verde serían pistas Tipo A, mientras que las demás zonas serían pistas Tipo B. Es importante recalcar que, en el caso de pistas cerradas, muy probablemente no se cumpla la distancia exacta de 100 [m]. Esto no importa siempre y cuando se tenga una distancia considerable para la prueba (distancia mínima en la cual se pueda observar el comportamiento del vehículo para una prueba en específico).

Además, muy probablemente no sea posible cubrir toda la pista con cámaras, por lo cual, para el caso de las pistas Tipo C se recomienda identificar zonas de interés (topes, subidas, bajadas, hoyos, etc. como observa se en la **Figura A.3**) y colocar cámaras en dichas zonas

## *A.V. IV. Preparación del Vehículo:*

- a) Montar vehículo en burros
- b) Desmontar las 4 llantas del vehículo todo terreno
- c) Colocar fuente de energía para el inflador de neumáticos al lado del vehículo (carro de un integrante, generador, etc.)
- d) Conectar el inflador de neumáticos a la fuente de energía (tener una persona asignada para esta actividad en específico)
- e) Inflar las 4 llantas a la presión correspondiente
- f) Montar las 4 llantas al vehículo todo terreno en el orden correspondiente
- g) Desmontar el vehículo de los burros
- h) Prender el vehículo (tener una persona asignada para esta actividad en específico)
- i) Colocar vehículo en la línea de salida
- j) Prender sistema de Instrumentación del vehículo
- k) Colocar vehículo en configuración correspondiente (4WD, RWD)
- l) Revisar que el vehículo cuente con suficiente gasolina (tener una persona asignada para esta actividad en específico)

- m) Revisar que el vehículo cuente con suficiente líquido de frenos (tener una persona asignada para esta actividad en específico)

## *A.V. V. Preparación del Piloto*

- a) Colocar equipo de seguridad en piloto (elementos enlistados en la sección **3.2 Equipo necesario para las pruebas**)
- b) Montar piloto en el vehículo y asegurar cinturones y hands (tener una persona asignada para esta actividad en específico)

## A. VI. Pruebas

### A.VI. I. Prueba de Aceleración:

- 1) Realizar el paso A. Preparación de la pista A
- 2) Realizar el paso D. Preparación del vehículo
- 3) Realizar el paso E. Preparación del piloto
- 4) Usar las banderas verdes para indicar que el vehículo arranque
- 5) Usar las banderas rojas y detener todos los cronómetros en cuanto las llantas delanteras toquen la línea de *Meta*
- 6) Realizar la prueba 3 veces; los integrantes designados en el paso A. Preparación de la pista A realizarán las actividades antes mencionadas
- 7) Después de cada intento, las personas con el *Formato de Recolección de Datos* para la prueba de Aceleración llenarán el formato.
- 8) Repetir esta prueba para todas, o la mayor cantidad de, las variaciones planteadas (presión de llantas, diferentes pilotos, entre otros)

#### A.VI.I. I. Formato de Recolección de datos para Aceleración

ACELERACIÓN- Vuelta #___	
Piloto	
Piloto:	
Peso	[Kg]
Características de la Pista	
Distancia Total	[m]
Tipo de Terreno	
Integrante A: Cronómetro Inicio	
Integrante B: Cronómetro Inicio	
Integrante C: Bandera Verde	
Integrante D: Bandera Verde	

# ACELERACIÓN- Vuelta #\_\_\_

Integrante E: Bandera Roja		
Integrante F: Bandera Roja		
Integrante G: Cronómetro Meta		
Integrante H: Cronómetro Meta		
Integrante I: Rec de Datos Inicio		
Integrante J: Rec de Datos Meta		
Cámara 1		
Cámara 2		
Cámara 3		
Cámara 4		
Tiempo		
Cronómetro A		[s]
Cronómetro B		[s]
Cronómetro G		[s]
Cronómetro H		[s]
Duración de Videos		
Cámara 1		[s]
Cámara 2		[s]
Cámara 3		[s]
Cámara 4		[s]
Presión de Neumáticos		
Inicial R1		[psi]
Inicial R2		[psi]
Inicial R3		[psi]
Inicial R4		[psi]
Final R1		[psi]
Final R2		[psi]
Final R3		[psi]
Final R4		[psi]
Situación del Vehículo Finalizando la Prueba		
¿Componentes rotos?		
¿Suficiente Líquido de Frenos?		
¿Suficiente gasolina?		
¿Tuercas/ tornillos flojos?		

# ACELERACIÓN- Vuelta #\_\_\_\_

Observaciones/comentarios

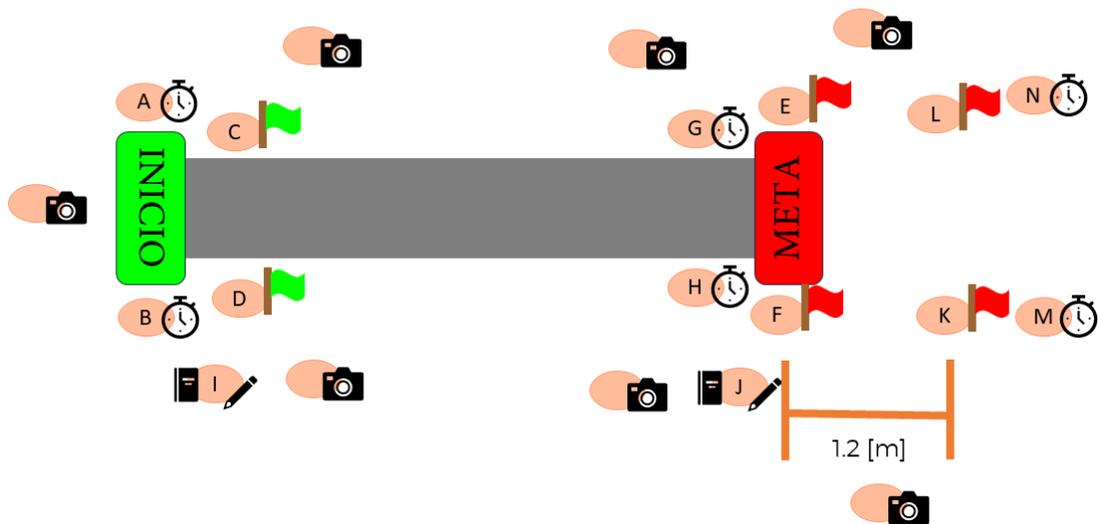
--

**Tabla A.1** – Formato de Recolección de Datos para Prueba de Aceleración

## A.VI. II. Prueba de Frenado:

- 1) Realizar el paso A. Preparación de la pista A
- 2) Realizar el paso D. Preparación del vehículo
- 3) Realizar el paso E. Preparación del piloto
- 4) Colocar otras dos banderas al final de la pista; una bandera irá al lado izquierdo de la pista, y la otra bandera, al lado derecho (de manera que en la *Meta* habrá 4 banderas, donde cada integrante con una bandera se tendrá que fijar en una llanta, revisando que si se bloqueen en cuanto el vehículo frene)
- 5) Colocar una cámara de cada lado de la pista, que grabe las 4 últimas banderas de manera lateral para detectar la distancia y tiempo que tarda en frenar el vehículo
- 6) Colocar una cámara que grabe al vehículo desde atrás para verificar que la luz de freno si prende, y en qué momento lo hace
- 7) Colocar dos integrantes con cronómetro, uno de cada lado, a la altura de las últimas dos banderas para tomar el tiempo total que tarda el vehículo en frenar
- 8) Usar las banderas verdes para indicar que el vehículo arranque
- 9) Usar las banderas rojas para indicarle al piloto en cuanto las llantas delanteras toquen la línea de *Meta* para indicarle al piloto que frene de golpe; en ese mismo instante, detener los cronómetros A y B
- 10) Marcar el tiempo parcial con los cronómetros G y H y empezar los cronómetros M y N en cuanto las llantas delanteras toquen la línea de *Meta*
- 11) Detener los cronómetros G, H, M y N en cuanto el vehículo se detenga por completo
- 12) Realizar la prueba 3 veces; los integrantes designados en el paso A. Preparación de la pista A realizarán las actividades antes mencionadas
- 13) Después de cada intento, las personas con el *Formato de Recolección de Datos* para la prueba de Frenado llenarán el formato
- 14) Repetir esta prueba para todas, o la mayor cantidad de, las variaciones planteadas (presión de llantas, diferentes pilotos, entre otros)

Las variaciones explicadas para la pista de Frenado se ven de la siguiente manera:



**Figura A. 5** – Alineación para **Pista A** adaptado a la prueba de Frenado

A.VI.II. I. Formato de Recolección de datos para Frenado

FRENADO - Vuelta #____	
Piloto	
Piloto:	<input type="text"/>
Peso	<input type="text"/> [Kg]
Características de la Pista	
Distancia Total (Inicio a Meta)	<input type="text"/> [m]
Distancia Frenado (Meta a Llantas Del)	<input type="text"/> [m]
Tipo de Terreno	<input type="text"/>
Integrante A: Cronómetro Inicio	<input type="text"/>
Integrante B: Cronómetro Inicio	<input type="text"/>
Integrante C: Bandera Verde	<input type="text"/>
Integrante D: Bandera Verde	<input type="text"/>
Integrante E: Bandera Roja	<input type="text"/>
Integrante F: Bandera Roja	<input type="text"/>

# FRENADO - Vuelta #\_\_\_

Integrante G: Cronómetro Meta	
Integrante H: Cronómetro Meta	
Integrante I: Rec de Datos Inicio	
Integrante J: Rec de Datos Meta	
Integrante K: Bandera Roja	
Integrante L: Bandera Roja	
Integrante M: Cronómetro Frenado	
Integrante N: Cronómetro Frenado	
Cámara 1	
Cámara 2	
Cámara 3	
Cámara 4	
Cámara 5	
Cámara 6	
Cámara 7	
Tiempo de Pista	
Cronómetro A: Tiempo Final	[s]
Cronómetro B: Tiempo Final	[s]
Cronómetro G: Tiempo Parcial	[s]
Cronómetro H: Tiempo Parcial	[s]
Tiempo de Frenado	
Cronómetro G: Tiempo Final	[s]
Cronómetro H: Tiempo Final	[s]
Cronómetro M: Tiempo Final	[s]
Cronómetro N: Tiempo Final	[s]
Duración de Videos	
Cámara 1	[s]
Cámara 2	[s]
Cámara 3	[s]
Cámara 4	[s]
Cámara 5	[s]
Cámara 6	[s]
Cámara 7	[s]
Presión de Neumáticos	

## FRENADO - Vuelta #\_\_\_\_

Inicial R1		[psi]
Inicial R2		[psi]
Inicial R3		[psi]
Inicial R4		[psi]
Final R1		[psi]
Final R2		[psi]
Final R3		[psi]
Final R4		[psi]
<b>Situación del Vehículo Finalizando la Prueba</b>		
¿Componentes rotos?		
¿Suficiente Líquido de Frenos?		
¿Suficiente gasolina?		
¿Tuercas/ tornillos flojos?		
¿Se prendió la luz de Frenos?		
¿Amarró la llanta R1?		
¿Amarró la llanta R2?		
¿Amarró la llanta R3?		
¿Amarró la llanta R4?		
Observaciones/ comentarios		

**Tabla A.2** – Formato de Recolección de Datos para Prueba de Frenado

## A.VI. III. Prueba de Pendiente (Subida y bajada):

- 1) Realizar el paso B. Preparación de la pista B
- 2) Realizar el paso D. Preparación del vehículo
- 3) Realizar el paso E. Preparación del piloto
- 4) Usar las banderas verdes para indicar que el vehículo arranque
- 5) Usar las banderas rojas y detener todos los cronómetros en cuanto las llantas delanteras toquen la línea de *Meta*
- 6) Realizar la prueba, de manera que los integrantes designados en el paso B. Preparación de la pista B realizarán las actividades antes mencionadas
- 7) Las personas con el *Formato de Recolección de Datos* para la prueba de Pendiente Subida llenarán el formato
- 8) Una vez que el vehículo llegue a la cima de la pendiente, darle la vuelta, y realizar el mismo procedimiento, pero invertido, observando al vehículo mientras baja (esto significa que las banderas rojas indicarán que el vehículo arranque, mientras que las verdes indicarán cuando las llantas delanteras del vehículo pasen la línea de *Meta*, que, en la etapa de subida de la pendiente, corresponde al Inicio)
- 9) Las personas con el *Formato de Recolección de Datos* para la prueba de Pendiente Bajada llenarán el formato
- 10) Realizar la prueba de Subida de Pendiente 3 veces y la prueba de Bajada de Pendiente 3 veces
- 11) Repetir esta prueba para todas, o la mayor cantidad de, las variaciones planteadas (presión de llantas, diferentes pilotos, entre otros)

A.VI.III. I. Formato de Recolección de datos para  
Pendiente Subida

PENDIENTE SUBIDA - Vuelta #___	
Piloto	
Piloto:	
Peso	[Kg]
Características de la Pista	
Distancia Total	[m]
Pendiente Mínima	[°]
Pendiente Máxima	[°]
Pendiente Promedio	[°]
Tipo de Terreno	
Integrante A: Cronómetro Inicio	
Integrante B: Cronómetro Inicio	
Integrante C: Bandera Verde	
Integrante D: Bandera Verde	
Integrante E: Bandera Roja y Celular	
Integrante F: Cronómetro Meta	
Integrante G: Cronómetro Meta	
Integrante H: Bandera Roja	
Integrante I: Bandera Roja	
Integrante J: Bandera Verde y Celular	
Integrante K: Rec de Datos Inicio	
Integrante L: Rec de Datos Meta	
Cámara 1 y Celular 1	
Cámara 2 y Celular 2	
Cámara 3 y Celular 3	
Cámara 4 y Celular 4	
Cámara 5 y Celular 5	
Cámara 6 y Celular 6	

# PENDIENTE SUBIDA - Vuelta #\_\_\_

Cámara 7 y Celular 7		
Cámara 8 y Celular 8		
<b>Tiempo de Pista</b>		
Cronómetro A: Tiempo Final		[s]
Cronómetro B: Tiempo Final		[s]
Cronómetro F: Tiempo Final		[s]
Cronómetro G: Tiempo Final		[s]
<b>Duración de Vídeos</b>		
Cámara 1		[s]
Cámara 2		[s]
Cámara 3		[s]
Cámara 4		[s]
Cámara 5		[s]
Cámara 6		[s]
Cámara 7		[s]
Cámara 8		[s]
<b>Presión de Neumáticos</b>		
Inicial R1		[psi]
Inicial R2		[psi]
Inicial R3		[psi]
Inicial R4		[psi]
Final R1		[psi]
Final R2		[psi]
Final R3		[psi]
Final R4		[psi]
<b>Situación del Vehículo Finalizando la Prueba</b>		
¿Componentes rotos?		
¿Suficiente Líquido de Frenos?		
¿Suficiente gasolina?		
¿Tuercas/ tornillos flojos?		
Observaciones/ comentarios		

**Tabla A.3** – Formato de Recolección de Datos para Prueba de Pendiente en Subida

A.VI.III. II. Formato de Recolección de datos para  
Pendiente Bajada

PENDIENTE BAJADA - Vuelta #___	
Piloto	
Piloto:	
Peso	[Kg]
Características de la Pista	
Distancia Total	[m]
Pendiente Mínima	[°]
Pendiente Máxima	[°]
Pendiente Promedio	[°]
Tipo de Terreno	
Integrante A: Cronómetro Meta	
Integrante B: Cronómetro Meta	
Integrante C: Bandera Verde	
Integrante D: Bandera Verde	
Integrante E: Bandera Roja y Celular	
Integrante F: Cronómetro Inicio	
Integrante G: Cronómetro Inicio	
Integrante H: Bandera Roja	
Integrante I: Bandera Roja	
Integrante J: Bandera Verde y Celular	
Integrante K: Rec de Datos Meta	
Integrante L: Rec de Datos Inicio	
Cámara 1 y Celular 1	
Cámara 2 y Celular 2	
Cámara 3 y Celular 3	
Cámara 4 y Celular 4	
Cámara 5 y Celular 5	
Cámara 6 y Celular 6	

Cámara 7 y Celular 7	
Cámara 8 y Celular 8	
<b>Tiempo de Pista</b>	
Cronómetro A: Tiempo Final	[s]
Cronómetro B: Tiempo Final	[s]
Cronómetro F: Tiempo Final	[s]
Cronómetro G: Tiempo Final	[s]
<b>Duración de Videos</b>	
Cámara 1	[s]
Cámara 2	[s]
Cámara 3	[s]
Cámara 4	[s]
Cámara 5	[s]
Cámara 6	[s]
Cámara 7	[s]
Cámara 8	[s]
<b>Presión de Neumáticos</b>	
Inicial R1	[psi]
Inicial R2	[psi]
Inicial R3	[psi]
Inicial R4	[psi]
Final R1	[psi]
Final R2	[psi]
Final R3	[psi]
Final R4	[psi]
<b>Situación del Vehículo Finalizando la Prueba</b>	
¿Componentes rotos?	
¿Suficiente Líquido de Frenos?	
¿Suficiente gasolina?	
¿Tuercas/ tornillos flojos?	
Observaciones/ comentarios	

**Tabla A.4** – Formato de Recolección de Datos para Prueba de Pendiente en Bajada

## A.VI. IV. Prueba de Suspensión:

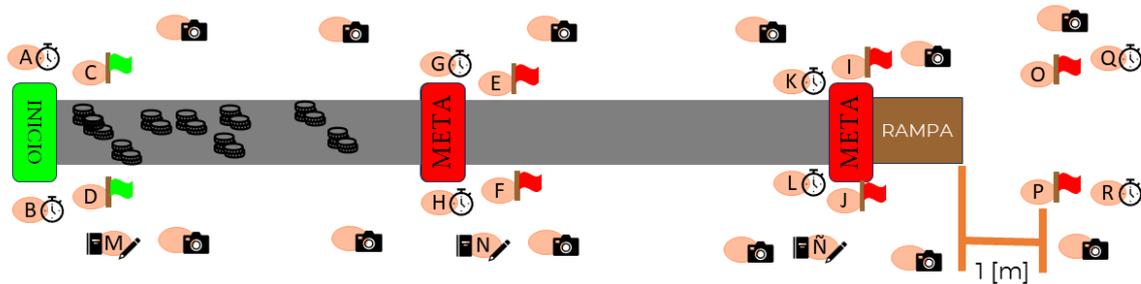
- 1) Realizar el paso A. Preparación de la pista A
- 2) Colocar elementos sobre los cuales el vehículo deberá pasar a lo largo de toda la pista de manera aleatoria (neumáticos viejos, rocas grandes, piedras chiquitas, tochos pesados de cero, entre otros)

*Nota: Recordar hacer uso de elementos naturales como hoyos, topes, boyas, terrenos irregulares, banquetas, entre otros para el diseño de la pista*

- 3) En la línea de *Meta* de la primera pista A, realizar otra vez el paso A. Preparación de la pista A de manera que queden dos pistas A como se observa en la Figura B.6.
- 4) Colocar el inicio de la rampa sobre la *Meta* de la segunda pista A
- 5) Realizar el paso D. Preparación del vehículo
- 6) Realizar el paso E. Preparación del piloto
- 7) Colocar otras dos banderas a de la pista a 1 metro de donde termina la rampa; una bandera irá al lado izquierdo de la pista, y la otra bandera, al lado derecho, como se observa en la Figura B.6.
- 8) Colocar una cámara de cada lado de la rampa, y una de cada lado donde se encuentran las banderas rojas O y P, para que graben la subida del vehículo en la rampa, el salto que realiza, y su caída al piso
- 9) Colocar dos integrantes con cronómetro (Q y R), uno de cada lado, a la altura de las últimas dos banderas (O y P) para tomar el tiempo total que tarda el vehículo en subir la rampa y caer
- 10) Usar las banderas verdes C y D para indicar que el vehículo arranque
- 11) Los integrantes designados en los puntos anteriores realizarán las actividades correspondientes
- 12) Usar las banderas rojas E y F en cuanto las llantas delanteras toquen la línea de *Meta* de la primera pista A, para indicarle a los cronómetros A y B que marquen su tiempo final, a los cronómetros G y H que marquen el tiempo parcial, y a los cronómetros K y L que inicien los cronómetros
- 13) Usar las banderas rojas I y J en cuanto las llantas delanteras toquen la línea de *Meta* de la segunda pista A, para indicarle a los cronómetros G y H que marquen

- su tiempo final, a los cronómetros K y L que marquen el tiempo parcial, y a los cronómetros Q y R que inicien los cronómetros
- 14) Usar las banderas rojas O y P para indicar el instante en que el vehículo caiga por completo (que ya no rebote, y que las 4 llantas toquen el piso) para detener los cronómetros K, L, Q y R
  - 15) En cuanto caiga del salto por la rampa por completo, frenar el vehículo
  - 16) Realizar la prueba 3 veces; los integrantes designados en el paso A. Preparación de la pista A realizarán las actividades antes mencionadas
  - 17) Después de cada intento, las personas con el *Formato de Recolección de Datos* para la prueba de Suspensión llenarán el formato.
  - 18) Repetir esta prueba para todas, o la mayor cantidad de, las variaciones planteadas (presión de llantas, diferentes pilotos, entre otros)

Las variaciones explicadas para la pista de Frenado se ven de la siguiente manera:



**Figura A.6** - Alineación para **Pista A** adaptado a la prueba de Suspensión

#### A.VI.IV. I. Formato de Recolección de datos para Suspensión

SUSPENSIÓN - Vuelta #____		
Piloto		
Piloto:		
Peso		[Kg]

# SUSPENSIÓN - Vuelta #\_\_\_

## Características de la Pista

Distancia Suspensión (Inicio a Meta)		[m]
Distancia Rampa (Meta a Meta)		S
Distancia Salto (Final Rampa a Llantas Del)		[m]
Ángulo Rampa		[°]
Altura Rampa		[m]
Longitud Rampa		[m]
Altura Salto (Altura Rampa a Llantas)		[m]
Tipo de Terreno		
Integrante A: Cronómetro Inicio		
Integrante B: Cronómetro Inicio		
Integrante C: Bandera Verde		
Integrante D: Bandera Verde		
Integrante E: Bandera Roja Suspe		
Integrante F: Bandera Roja Suspe		
Integrante G: Cronómetro Meta Suspe		
Integrante H: Cronómetro Meta Suspe		
Integrante I: Bandera Roja Rampa		
Integrante J: Bandera Roja Rampa		
Integrante K: Cronómetro Rampa		
Integrante L: Cronómetro Rampa		
Integrante M: Rec de Datos Inicio		
Integrante N: Rec de Datos Meta Suspe		
Integrante Ñ: Rec de Datos Meta Rampa		
Integrante O: Bandera Roja Salto		
Integrante P: Bandera Roja Salto		
Integrante Q: Cronómetro Salto		
Integrante R: Cronómetro Salto		
Cámara 1		
Cámara 2		
Cámara 3		
Cámara 4		
Cámara 5		

# SUSPENSIÓN - Vuelta #\_\_\_

Cámara 6		
Cámara 7		
Cámara 8		
Cámara 9		
Cámara 10		
Cámara 11		
Cámara 12		
<b>Tiempo de Pista Suspensión</b>		
Cronómetro A: Tiempo Final		[s]
Cronómetro B: Tiempo Final		[s]
Cronómetro G: Tiempo Parcial		[s]
Cronómetro H: Tiempo Parcial		[s]
<b>Tiempo de Rampa</b>		
Cronómetro G: Tiempo Final		[s]
Cronómetro H: Tiempo Final		[s]
Cronómetro K: Tiempo Parcial		[s]
Cronómetro L: Tiempo Parcial		[s]
<b>Tiempo de Salto</b>		
Cronómetro K: Tiempo Final		[s]
Cronómetro L: Tiempo Final		[s]
Cronómetro Q: Tiempo Final		[s]
Cronómetro R: Tiempo Final		[s]
<b>Duración de Videos</b>		
Cámara 1		[s]
Cámara 2		[s]
Cámara 3		[s]
Cámara 4		[s]
Cámara 5		[s]
Cámara 6		[s]
Cámara 7		[s]
Cámara 8		[s]
Cámara 9		[s]
Cámara 10		[s]
Cámara 11		[s]

# SUSPENSIÓN - Vuelta #\_\_\_\_

Cámara 12		[s]
<b>Presión de Neumáticos</b>		
Inicial R1		[psi]
Inicial R2		[psi]
Inicial R3		[psi]
Inicial R4		[psi]
Final R1		[psi]
Final R2		[psi]
Final R3		[psi]
Final R4		[psi]
<b>Situación del Vehículo Finalizando la Prueba</b>		
¿Componentes rotos?		
¿Suficiente Líquido de Frenos?		
¿Suficiente gasolina?		
¿Tuercas/ tornillos flojos?		
Observaciones/ comentarios		

**Tabla A.5** – Formato de Recolección de Datos para Prueba de Suspensión

## A.VI. V. Prueba de Arrastre:

- 1) Realizar el paso A. Preparación de la pista A
- 2) Realizar el paso D. Preparación del vehículo
- 3) Colocar camioneta atrás del vehículo y amarrarla a la hitch trasera del vehículo
- 4) Realizar el paso E. Preparación del piloto
- 5) Usar las banderas verdes para indicar que el vehículo arranque
- 6) Usar las banderas rojas y detener todos los cronómetros en cuanto las llantas delanteras toquen la línea de *Meta*
- 7) Realizar la prueba 3 veces; los integrantes designados en el paso A. Preparación de la pista A realizarán las actividades antes mencionadas
- 8) Después de cada intento, las personas con el *Formato de Recolección de Datos* para la prueba de Arrastre llenarán el formato.
- 9) Repetir esta prueba para todas, o la mayor cantidad de, las variaciones planteadas (presión de llantas, diferentes pilotos, entre otros)

### A.VI.V. I. Formato de Recolección de datos para Arrastre

ARRASTRE - Vuelta #____	
Piloto	
Piloto:	
Peso	[Kg]
Características de la Pista	
Distancia Total	[m]
Tipo de Terreno	
Peso del Vehículo a Arrastrar	[Kg]
Integrante A: Cronómetro Inicio	
Integrante B: Cronómetro Inicio	

# ARRASTRE - Vuelta #\_\_\_

Integrante C: Bandera Verde	
Integrante D: Bandera Verde	
Integrante E: Bandera Roja	
Integrante F: Bandera Roja	
Integrante G: Cronómetro Meta	
Integrante H: Cronómetro Meta	
Integrante I: Rec de Datos Inicio	
Integrante J: Rec de Datos Meta	
Cámara 1	
Cámara 2	
Cámara 3	
Cámara 4	
<b>Tiempo</b>	
Cronómetro A	[s]
Cronómetro B	[s]
Cronómetro G	[s]
Cronómetro H	[s]
<b>Duración de Videos</b>	
Cámara 1	[s]
Cámara 2	[s]
Cámara 3	[s]
Cámara 4	[s]
<b>Presión de Neumáticos</b>	
Inicial R1	[psi]
Inicial R2	[psi]
Inicial R3	[psi]
Inicial R4	[psi]
Final R1	[psi]
Final R2	[psi]
Final R3	[psi]
Final R4	[psi]
<b>Situación del Vehículo Finalizando la Prueba</b>	
¿Componentes rotos?	
¿Suficiente Líquido de Frenos?	

# ARRASTRE - Vuelta #\_\_\_\_

¿Suficiente gasolina?	
¿Tuercas/ tornillos flojos?	
Observaciones/ comentarios	

**Tabla A.6** – Formato de Recolección de Datos para Prueba de Arrastre

## A.VI. VI. Prueba de Maniobrabilidad:

**Nota:** Debido a que la prueba de Maniobrabilidad en competencia no tiene un diseño definido, sino que varía entre cada competencia, por lo cual se mezclarán las **pistas A y B** para observar el comportamiento del vehículo en ambas situaciones (secciones rectas y secciones curvas)

- 1) Realizar el paso A. Preparación de la pista A
- 2) Realizar el paso B. Preparación de la pista B

**Nota:** Las banderas verdes y los cronómetros al inicio de la Pista B no serán necesarios debido a las banderas rojas y cronómetros en la meta de la Pista A; esto se observa en la **Figura A.7.**

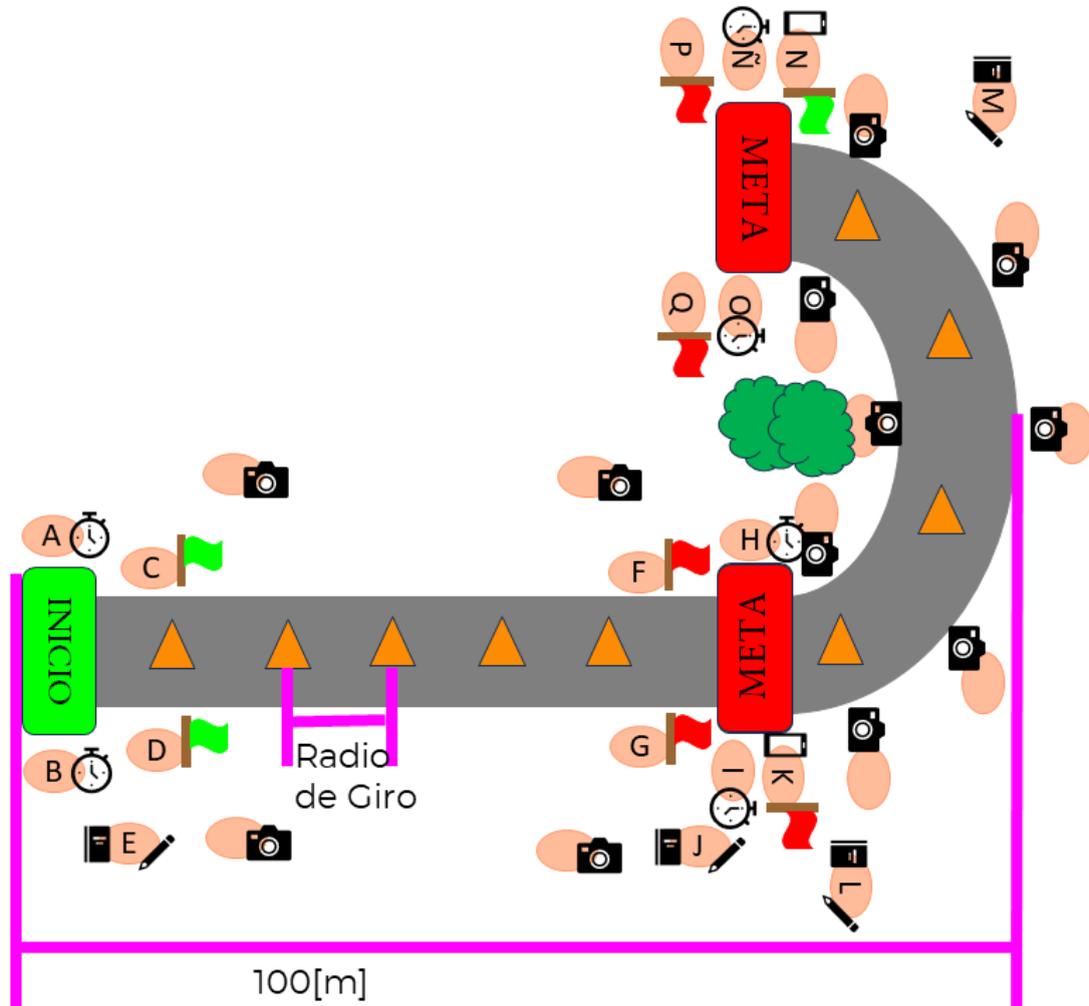
- 3) Realizar el paso D. Preparación del vehículo
- 4) Realizar el paso E. Preparación del piloto
- 5) Agregar conos a lo largo de la pista A y pista B con una distancia de *Radio de Giro* entre ellos

**Nota:** El *Radio de Giro* del vehículo es la distancia mínima desde el centro de la trayectoria circular que sigue el vehículo al girar el volante a su máxima posición de giro, hasta el vehículo; en otras palabras, el radio mínimo que puede girar el vehículo, es un valor calculado a partir del diseño de la dirección del vehículo

**Nota:** En caso de que el *Radio de Giro* sea menor al ancho total del vehículo, usar el ancho del vehículo como la distancia entre los conos

- 6) Usar las banderas verdes para indicar que el vehículo arranque
- 7) Los integrantes designados en los puntos anteriores realizarán las actividades correspondientes
- 8) Usar las banderas rojas F y G, para indicarle a los cronómetros en cuanto las llantas delanteras toquen la línea de **Meta de la Pista A** para indicarle a los cronómetros A y B que marquen su tiempo final, a los cronómetros H e I que marquen el tiempo parcial, y a los cronómetros Ñ y O que inicien los cronómetros
- 9) Usar las banderas rojas P y Q para indicar el instante en que las llantas delanteras del vehículo toquen la línea de **Meta de la Pista B** para indicarle a los cronómetros H, I, Ñ y O que marquen en tiempo final
- 10) Realizar la prueba 3 veces; los integrantes designados en el paso **A. Preparación de la pista A** y en el paso **B. Preparación de la pista B**, realizarán las actividades antes mencionadas

- 11) Después de cada intento, las personas con el **Formato de Recolección de Datos** para la prueba de Maniobrabilidad llenarán el formato.
- 12) Repetir esta prueba para todas, o la mayor cantidad de, las variaciones planteadas (presión de llantas, diferentes pilotos, entre otros)



**Figura A.7** - Alineación para **Pista A** y **Pista B** adaptadas a la prueba de Maniobrabilidad

## A.VI.VI. I. Formato de Recolección de datos para Maniobrabilidad

# MANIOBRABILIDAD - Vuelta #\_\_\_

## Piloto

Piloto:	
Peso	[Kg]

## Características de la Pista

Distancia Total Recta (Inicio a Meta)	[m]
Distancia Total Curva (Meta a Meta)	[m]
Longitud Pista (líneas moradas Figura B.7)	[m]
Tipo de Terreno	
Integrante A: Cronómetro Inicio	
Integrante B: Cronómetro Inicio	
Integrante C: Bandera Verde	
Integrante D: Bandera Verde	
Integrante E: Rec de Datos Inicio	
Integrante F: Bandera Roja Recta	
Integrante G: Bandera Roja Recta	
Integrante H: Cronómetro Meta Recta	
Integrante I: Cronómetro Meta Recta	
Integrante J: Rec de Datos Meta Recta	
Integrante K: Bandera Roja c/ Cel	
Integrante L: Rec de Datos Inicio Curva	
Integrante M: Rec de Datos Meta Curva	
Integrante N: Bandera Verde c/ Cel	
Integrante Ñ: Cronómetro Meta Curva	
Integrante O: Cronómetro Meta Curva	
Integrante P: Bandera Roja Curva	
Integrante Q: Bandera Roja Curva	
Cámara 1	
Cámara 2	
Cámara 3	
Cámara 4	
Cámara 5	
Cámara 6	
Cámara 7	

# MANIOBRABILIDAD - Vuelta #\_\_\_

Cámara 8		
Cámara 9		
Cámara 10		
Cámara 11		
Cámara 12		
<b>Tiempo de Pista Recta</b>		
Cronómetro A: Tiempo Final		[s]
Cronómetro B: Tiempo Final		[s]
Cronómetro H: Tiempo Parcial		[s]
Cronómetro I: Tiempo Parcial		[s]
<b>Tiempo de Pista Curva</b>		
Cronómetro H: Tiempo Final		[s]
Cronómetro I: Tiempo Final		[s]
Cronómetro Ñ: Tiempo Final		[s]
Cronómetro O: Tiempo Final		[s]
<b>Duración de Videos</b>		
Cámara 1		[s]
Cámara 2		[s]
Cámara 3		[s]
Cámara 4		[s]
Cámara 5		[s]
Cámara 6		[s]
Cámara 7		[s]
Cámara 8		[s]
Cámara 9		[s]
Cámara 10		[s]
Cámara 11		[s]
Cámara 12		[s]
<b>Presión de Neumáticos</b>		
Inicial R1		[psi]
Inicial R2		[psi]
Inicial R3		[psi]
Inicial R4		[psi]
Final R1		[psi]

# MANIOBRABILIDAD - Vuelta #\_\_\_\_

Final R2		[psi]
Final R3		[psi]
Final R4		[psi]
Situación del Vehículo Finalizando la Prueba		
¿Componentes rotos?		
¿Suficiente Líquido de Frenos?		
¿Suficiente gasolina?		
¿Tuercas/ tornillos flojos?		
¿Qué conos tiraron?		
¿Qué conos se evitaron?		
Observaciones/ comentarios		

**Tabla A.7** – Formato de Recolección de Datos para Prueba de Maniobrabilidad

## A.VI. VII. Prueba de Endurance:

- 1) Realizar el paso C. Preparación de la pista C
- 2) Realizar el paso D. Preparación del vehículo
- 3) Realizar el paso E. Preparación del piloto
- 4) Usar las banderas verdes para indicar que el vehículo arranque
- 5) Usar las banderas rojas y detener todos los cronómetros en cuanto las llantas delanteras toquen la línea de *Meta*
- 6) Realizar la prueba 3 veces (1 prueba corresponde a 3 vueltas completas de la pista sin parar); los integrantes designados en el paso C. Preparación de la pista C realizarán las actividades antes mencionadas en cada vuelta que dé el vehículo

**Nota:** Debido a que cada prueba se realizará 3 veces, los cronómetros tomarán tiempos parciales en vez de finales hasta que sea la 3era vuelta del vehículo.

**Nota:** Si el número de cámaras no se acompletan para cubrir toda la pista, entonces lo que se hará, será colocar aquellas cámaras que se encuentran al inicio y al final de cada región de la pista, y, en regiones intermedias, sólo irán cámaras abarcando los elementos de interés cómo, por ejemplo, algún tope, hoyo, boyas, u obstáculos similares a los que se enfrente el vehículo.

- 7) Después de cada prueba, las personas con el *Formato de Recolección de Datos* para la respectiva prueba que cubran, llenarán el formato correspondiente
- 8) Repetir esta prueba para todas, o la mayor cantidad de, las variaciones planteadas (presión de llantas, diferentes pilotos, entre otros)

# Anexo B. Ejemplo de creación de una pista

## *B. I. Paso 1 – Generar Matriz de Decisión*

Para poder seleccionar las pruebas que se realizarán en las pistas buscadas, se realizarán dos Matrices de Decisión usando el formato mostrado a continuación:

Pruebas	Criterio 1	Factor 1	Criterio 2	Factor 2	Criterio 3	Factor 3	Criterio 4	Factor 4	Criterio 5	Factor 5	Criterio N	Factor N	Total
Prueba 1													
Prueba 2													
Prueba n													

**Figura B.1 – Formato de Matriz de Decisión**

La razón por la que se realizan dos matrices, es porque una se enfocará en escoger las pruebas donde el vehículo ha tenido peor desempeño, y la otra se enfocará en escoger las pruebas donde el vehículo ha tenido el mejor desempeño. Si bien se recomienda que la prioridad recaiga siempre en la prueba de mejor desempeño, tener estas dos pruebas objetivo ayudará a balancear las características del carro para abarcar una mayor cantidad de pruebas en la competencia en vez de enfocar el diseño en una sola prueba.

### *B.I. I. Paso 1.a - Lluvia de Ideas*

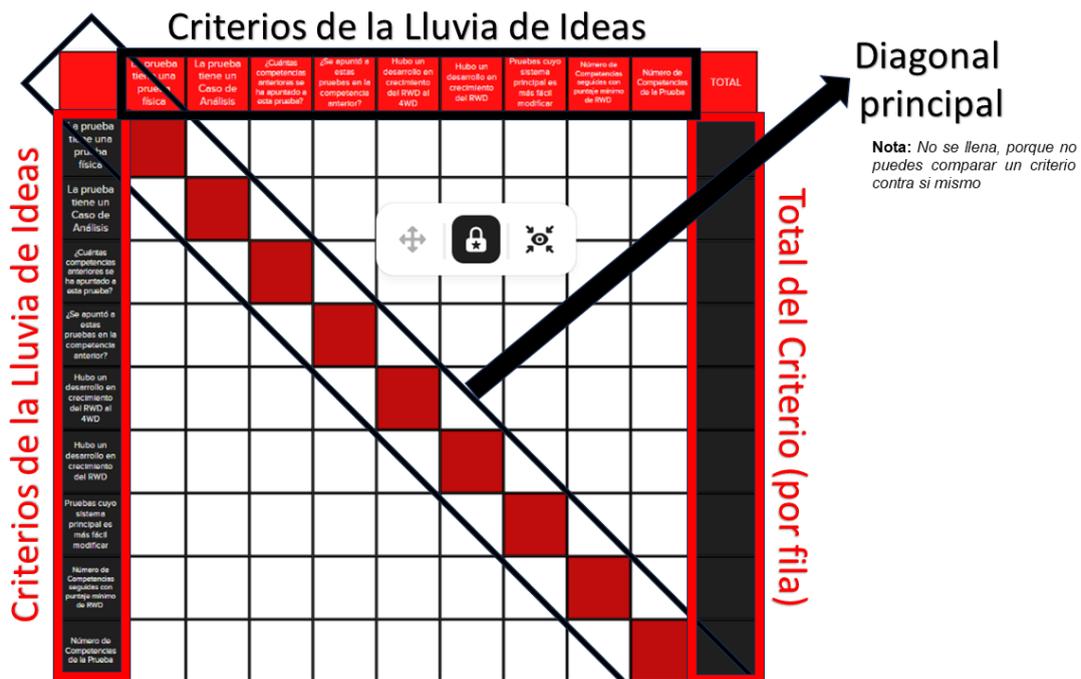
Para empezar a llenar la matriz, se debe saber qué criterios se van a comparar, para lo cual se recomienda realizar una lluvia de ideas:

Idea	Justificación
La prueba tiene una validación física	Esto ayuda a obtener datos reales
La prueba tiene un caso de análisis	Comparación entre datos reales y cálculos para sacar conclusiones
¿Cuántas competencias anteriores se ha apuntado a esta prueba?	Habrà documentación que ayude a ver y entender decisiones tomadas
¿Se apuntó a estas pruebas en la competencia anterior?	El vehículo/ diseño tendrá características que ayuden a la prueba
Hubo un desarrollo de crecimiento del RWD al 4WD	Habrà documentación que ayude a ver y entender decisiones tomadas
Hubo un desarrollo de crecimiento del RWD	Habrà documentación que ayude a ver y entender decisiones tomadas
Pruebas cuyo sistema principal es más fácil modificar	Esto apoyará en tiempos de desarrollo
Número de competencias seguidas con puntaje mínimo	Gran número de competencias implica que no se dio correcto seguimiento a la prueba
Número de competencias donde se ha llevado a cabo la prueba	Habrà documentación que ayude a ver y entender decisiones tomadas

**Tabla B.1** – Resumen de Lluvia de Ideas para Criterios de Matriz de Decisión

## *B.I. II. Paso 1.b – Priorización de Criterios*

Se realiza una Matriz de Priorización para ordenar los criterios del más, al menos importante. La manera de llenar esta matriz, es colocando todos los criterios de la lluvia de ideas tanto en la primera columna, como en la primera fila; los criterios deben estar en el mismo orden:



**Figura B.2 – Matriz de Priorización de Criterios**

Posteriormente, colocar un 1 en aquellos cuadros donde el criterio de la fila sea más importante que el de la columna, y 0 si no se cumple esto. La columna de TOTAL corresponderá a la suma de 1s a lo largo de la fila:

	La prueba tiene una prueba física	La prueba tiene un Caso de Análisis	¿Cuántas competencias anteriores se ha apuntado a esta prueba?	¿Se apuntó a estas pruebas en la competencia anterior?	Hubo un desarrollo en crecimiento del RWD al 4WD	Hubo un desarrollo en crecimiento del RWD	Pruebas cuyo sistema principal es más fácil modificar	Número de Competencias seguidas con porcentaje mínimo de RWD	Número de Competencias de la Prueba	TOTAL
La prueba tiene una prueba física		1	1	1	1	1	1	1	1	8
La prueba tiene un Caso de Análisis	0		1	1	1	1	0	1	1	6
¿Cuántas competencias anteriores se ha apuntado a esta prueba?	0	0		0	0	1	1	0	0	2
¿Se apuntó a estas pruebas en la competencia anterior?	0	0	1		1	0	1	0	0	3
Hubo un desarrollo en crecimiento del RWD al 4WD	0	0	1	0		0	1	0	0	2
Hubo un desarrollo en crecimiento del RWD	0	0	0	1	1		1	0	0	3
Pruebas cuyo sistema principal es más fácil modificar	0	1	0	0	0	0		0	0	1
Número de Competencias seguidas con porcentaje mínimo de RWD	0	0	1	1	1	1	1		0	5
Número de Competencias de la Prueba	0	0	1	1	1	1	1	1		6

**Figura B.3 – Matriz de Priorización de Criterios Resuelta**

Ordenando los criterios en el formato mostrado en la **Figura B. 3:**

	8		6		6		3		3		2		2		1		Total
Pruebas en Crecimiento	La prueba tiene una prueba física	Factor 1	La prueba tiene un Caso de Análisis	Factor 2	Número de Competencias seguidas con puntaje mínimo de RWD	Factor 3	Hubo un decremento en crecimiento del RWD	Factor 4	¿Se apuntó a estas pruebas en la competencia anterior?	Factor 5	Hubo un decremento en crecimiento del RWD al RWD	Factor 6	¿Cuántas competencias anteriores se ha apuntado a esta prueba?	Factor 7	Pruebas cuyo sistema principal es más fácil modificar	Factor 8	
Prueba 1																	
Prueba 2																	
Prueba 3																	

**Figura B.4 – Matriz de Decisión con Criterios**

Eso significa que, de izquierda a derecha, el valor del factor deberá ir decreciendo debido a que van de mayor a menor importancia (a excepción de aquellos criterios que tuvieron el mismo resultado en este paso).

### B.I. III. Paso 1.c – Llenando las Pruebas

Analizando los históricos del equipo (Figuras 1.1 a 1.6 en el **Capítulo I** de esta tesis), se puede observar que las pruebas donde el vehículo ha tenido mejor desempeño son: **Rocas, Lodo y Arrastre**. Estas englobarán la matriz de *Pruebas en Crecimiento*, y las demás la matriz de *Pruebas en Decrecimiento*:

Pruebas en Decrecimiento	La prueba tiene una prueba física	Factor 1	La prueba tiene un Caso de Análisis	Factor 2	Número de Competencias seguidas con puntaje mínimo de RWD	Factor 3	Hubo un decremento en crecimiento del RWD	Factor 4	¿Se apuntó a estas pruebas en la competencia anterior?	Factor 5	Hubo un decremento en crecimiento del RWD al RWD	Factor 6	¿Cuántas competencias anteriores se ha apuntado a esta prueba?	Factor 7	Pruebas cuyo sistema principal es más fácil modificar	Factor 8	Total
Rocas																	
Lodo																	
Arrastre																	
Pruebas en Crecimiento	La prueba tiene una prueba física	Factor 1	La prueba tiene un Caso de Análisis	Factor 2	Número de Competencias seguidas con puntaje mínimo de RWD	Factor 3											
Rocas																	
Lodo																	
Arrastre																	

**Figura B.5 – Matriz de Decisión con Criterios para Pruebas de Mejor Desempeño**

Pruebas en Incremento	¿La prueba tiene una prueba física?	La prueba tiene un Caso de Análisis	Número de Competencias seguidas con puntaje mínimo de RWI	Hubo un desarrollo en el puntaje del RWI	¿Se recibió o está previsto en la competencia anterior?	Hubo un desarrollo en el puntaje del RWI al RWI	¿Cumplieron competencias en el puntaje de evaluación?	Hubo un desarrollo en el puntaje de RWI	Hubo desarrollo en el puntaje de RWI	Total
Aceleración										
Suspensión										
Pendiente										
Maniobrabilidad										

**Figura B.6 – Matriz de Decisión con Criterios para Pruebas de Peor Desempeño**

## B. II. Paso 2 – Analizar los criterios

Con las matrices generadas, se debe llenar contestando la siguiente pregunta: “¿la prueba cumple con el criterio?”. Debido a que cada criterio se responde de diferente manera y con diferentes valores, se deben estandarizar dichas evaluaciones para lo cual se propone el siguiente esquema:

Valor	Interpretación
2	Pésimo
4	Malo
6	Regular
8	Bien
10	Excelente

**Tabla B.2 – Estandarización de Evaluación para Matriz de Decisión**

Dicho esquema se debe aplicar a la evaluación de cada criterio, sin embargo, para evitar alargar más el texto, sólo se usarán algunos criterios como ejemplo de cómo realizar este paso:

a) Criterio 1: *La prueba tiene una prueba física*

Debido a que es una pregunta de Si/ No, entonces no se tienen tantas posibilidades, por lo cual, traducido a nuestro esquema quedaría como:

Valor	Interpretación
2	No tiene validación física
4	NA
6	Se puede hacer una validación física, pero su costo/dificultad es elevado
8	NA
10	Tiene prueba física "fácil" de realizar

**Tabla B.3 – Descripción de Calificaciones para Criterio 1**

b) Criterio 3: *Número de competencias seguidas con puntaje mínimo*

Con base a información del equipo, se tiene:

Pruebas	Competencias seguidas con puntaje mínimo	Total de competencias donde ha estado la prueba	Porcentaje
Aceleración	2	13	15%
Suspensión	4	12	33%
Rocas	1	9	11%
Lodo	1	7	14%
Pendiente	2	12	17%
Maniobrabilidad	7	13	54%
Arrastre	1	6	17%

**Tabla B.4 – Análisis para Criterio 3**

Se puede observar, que el menor porcentaje de competencias seguidas con puntaje mínimo es del 9%, mientras que el mayor porcentaje es de 54%. Por lo tanto, 9% será

equivalente a 10 (Excelente), y 54% a 2 (Pésimo). Los demás valores se interpolarán, lo cual queda de la siguiente manera:

$$Rango = \frac{(\Delta Pruebas)}{\#Evaluación} \quad (4.1)$$

Donde:

$\Delta Pruebas$  = Diferencia entre mayor porcentaje de competencias menos menor porcentaje de competencias

$\Delta Pruebas = 54\% - 9\% = 35\%$

$\#Evaluación =$  Es el número de divisiones que tiene la evaluación = 5 (2,4,6,8,10)

Sustituyendo en (4.1):

$$Rango = \frac{35\%}{5} = 7\%$$

Por lo tanto, los rangos del criterio son:

Valor	Interpretación
2	[54%, 37%]
4	[37%, 30%]
6	[30%, 23%]
8	[23%, 16%]
10	[16%, 9%]

**Tabla B.5 – Descripción de Calificaciones para Criterio 3**

c) Criterio 7: *¿Cuántas competencias anteriores se ha apuntado a esta prueba?*

Tener “Pruebas objetivo” se implementó en la competencia *México 2020*, por lo cual la cantidad de información al respecto es casi nula. Por esta razón, este criterio se eliminará de ambas Matrices de Decisión.

d) Criterio 8: *Pruebas cuyo sistema principal es más fácil de modificar*

Para poder definir el término “fácil”, este criterio se comparará en términos de tiempo. Para esto, se debe realizar un Work Breakdown Structure (WBS) e indicar tiempos aproximados. Por cuestiones de tiempo, este Criterio no será desarrollado en este trabajo.

Se deben realizar estos procesos de análisis para todos los criterios y llenar las matrices en las columnas de los criterios (no de los factores). Además, se observan criterios con respuestas de NA (como el Criterio 7 antes explicado), y criterios donde todas las pruebas tienen la misma calificación o calificaciones muy similares. Todas estas columnas no aportarán a la decisión, por lo cual se simplifican las matrices. Este proceso queda de la siguiente manera:

Pruebas en Crecimiento	¿Se puntó a esta prueba física?	Factor 1	¿La prueba tiene un Caso de Análisis?	Factor 2	Número de competencias de la Prueba	Factor 3	Hubo un desarrollo en crecimiento del RWD?	Factor 4	¿Se apuntó a estas pruebas en la competencia anterior?	Factor 5	Hubo un desarrollo en crecimiento del RWD?	Factor 6	¿Cuales competencias anteriores se ha apuntado a esta prueba?	Factor 7	¿Se apuntó a estas pruebas en la competencia anterior?	Factor 8	Total	
Rocas	6		8		6		2		4		10		4		NA		NA	
Lodo	6		2		2		2		6		2		4		NA		NA	
Arrastre	10		10		2		2		10		4		4		NA		NA	

Pruebas en Crecimiento	La prueba tiene una prueba física	Factor 1	La prueba tiene un Caso de Análisis	Factor 2	Número de competencias de la Prueba	Factor 3	Hubo un desarrollo en crecimiento del RWD	Factor 5	¿Se apuntó a estas pruebas en la competencia anterior?	Factor 6	Total
Rocas	6		8		6		4		10		
Lodo	6		2		2		6		2		
Arrastre	10		10		2		10		4		

**Figura B.7** – Matriz de Decisión con análisis de criterios; matriz superior corresponde a la matriz llena con criterios a eliminar, matriz inferior es la matriz simplificada)

## B. III. Paso 3 – Colocar Factores

El último paso para poder resolver las matrices de decisión, es asignarle un factor de importancia a cada uno, el cual no deberá ser menor a 0.1 para que no pierda relevancia en la decisión final. Además, la suma de los factores de todos los criterios para una sola prueba (una fila) deberá ser igual a 1. Basándose en la Matriz de Priorización, los criterios 2 y 3 (*La prueba tiene un Caso de Análisis* y *Número de Competencias de la Prueba*) tienen un mismo resultado (6), por lo cual deberían tener un valor de importancia cercano o incluso igual entre ellos. Lo mismo ocurre con los criterios 4 y 5 (*Hubo un desarrollo en crecimiento del RWD* y *¿Se apuntó a estas pruebas en la competencia anterior?*). Partiendo de esto, se proponen los siguientes factores:

	8		6		6		3		3		
Pruebas en Crecimiento	La prueba tiene una prueba física	Factor 1	La prueba tiene un Caso de Análisis	Factor 2	Número de competencias de la Prueba	Factor 3	Hubo un desarrollo en crecimiento del RWD	Factor 5	¿Se apuntó a estas pruebas en la competencia anterior?	Factor 6	Total
Rocas	6	0.35	8	0.2	6	0.2	4	0.15	10	0.1	
Lodo	6	0.35	2	0.2	2	0.2	6	0.15	2	0.1	
Arrastre	10	0.35	10	0.2	2	0.2	10	0.15	4	0.1	

**Figura B.8 – Matriz de Decisión Llenada**

Verificando que se cumplan los requisitos antes mencionados:

- La suma de los factores da 1:  $0.35 + 0.2 + 0.2 + 0.15 + 0.1 = 1$  - Sí
- El factor 1 es mayor a cualquiera de los demás factores - Sí
- El factor 2 y 3 son iguales o similares y mayores a los factores 4 y 5 - Sí
- El factor 4 y 5 son iguales o similares - Sí

Por lo tanto, cumple todos los requisitos, por lo que pasamos a resolver la matriz de la siguiente manera:

$$(Criterio_1 \times Factor_1) + (Criterio_2 \times Factor_2) + \dots (Criterio_n \times Factor_n) = Total \quad (4.2)$$

Lo cual nos queda como:

	8		6		6		3		3						
Pruebas en Crecimiento	La prueba tiene una prueba física	Factor 1	La prueba tiene un Caso de Análisis	Factor 2	Número de competencias de la Prueba	Factor 3	Hubo un desarrollo en crecimiento del RWD	Factor 5	¿Se apuntó a estas pruebas en la competencia anterior?	Factor 6	Total				
Rocas	6	$\times 0.35$	+	8	$\times 0.2$	+	6	$\times 0.2$	+	4	$\times 0.15$	+	10	$\times 0.1$	6.5
Lodo	6	$\times 0.35$	+	2	$\times 0.2$	+	2	$\times 0.2$	+	6	$\times 0.15$	+	2	$\times 0.1$	4
Arrastre	10	$\times 0.35$	+	10	$\times 0.2$	+	2	$\times 0.2$	+	10	$\times 0.15$	+	4	$\times 0.1$	7.8

**Figura B.9 - Matriz de Decisión para Pruebas en Crecimiento con Total Calculado**

Realizando el mismo proceso para las pruebas en decrecimiento:

		8		6		6		3		3	
Pruebas en Crecimiento	La prueba tiene una prueba física	Factor 1	La prueba tiene un Caso de Análisis	Factor 2	Número de Competencias seguidas con puntaje mínimo de RWD	Factor 4	¿Se apuntó a estas pruebas en la competencia anterior?	Factor 6	Hubo un desarrollo en crecimiento del RWD al 4WD	Factor 7	Total
Aceleración	10	×0.31	+ 4	×0.24	+ 2	×0.2	+ 4	×0.15	+ 2	×0.1	5.26
Suspensión	10	×0.31	+10	×0.24	+ 6	×0.2	+ 8	×0.15	+ 4	×0.1	8.3
Pendiente	6	×0.31	+ 8	×0.24	+ 2	×0.2	+10	×0.15	+ 4	×0.1	6.08
Maniobrabilidad	10	×0.31	+10	×0.24	+10	×0.2	+ 8	×0.15	+10	×0.1	9.7

**Figura B.10** - Matriz de Decisión para Pruebas en Decrecimiento con Total Calculado

Con un puntaje de 9.7, 8.3 y 7.8, la pista deberá incluir las pruebas de Maniobrabilidad, Suspensión y Arrastre dentro de su diseño. Se buscará que la mayor porción de la pista esté dedicada a Maniobrabilidad debido a ser el de más alto puntaje, y la menor porción sea de Arrastre.

## ***B. IV. Paso 4 – Diseñar la pista***

Ahora que se sabe la estructura teórica de la pista, se usarán las fotos aéreas de las propuestas de pistas para proponer la división de la misma. Por razones explicadas en el **Capítulo 4**, se usará la pista del **Estadio de Beisbol en C.U.** como ejemplo:

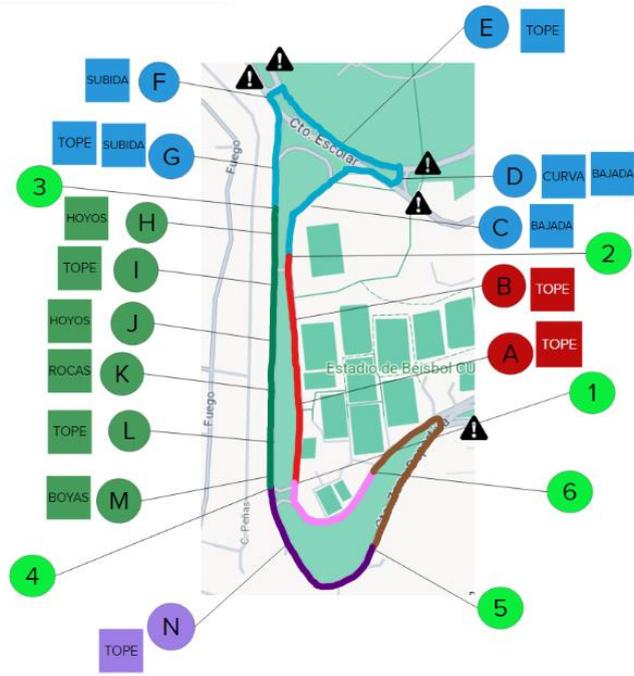


Figura B.11 - Pista creada 1

En dónde tenemos que:

PRUEBAS	REGIÓN QUE ABARCA	COLOR DE LA REGIÓN	ELEMENTOS NATURALES DE LA PISTA	ELEMENTOS EXTERNOS PARA LA PRUEBA
SUSPENSIÓN	INICIO: Punto 1 FIN: Punto 2	ROJO	2 Topes	Rampas, Liantas
MANIOBRABILIDAD	INICIO: Punto 2 FIN: Punto 3	AZUL	Bajadas, Subidas, Curvas y 2 Topes	Conos, Liantas
SUSPENSIÓN	INICIO: Punto 3 FIN: Punto 4	VERDE	2 Hoyos, 2 Topes, 1 Roca y 1 Zona de Bolas Metálicas	Rampas, Liantas
MANIOBRABILIDAD	INICIO: Punto 4 FIN: Punto 5	MORADO	1 Tope	Conos, Liantas
ARRASTRE	INICIO: Punto 5 FIN: Punto 6	CAFÉ	Nada	2 Camionetas
MANIOBRABILIDAD	INICIO: Punto 6 FIN: Punto 1	ROSA	Nada	Conos, Liantas

Figura B.12 – Resumen de la Pista creada 1

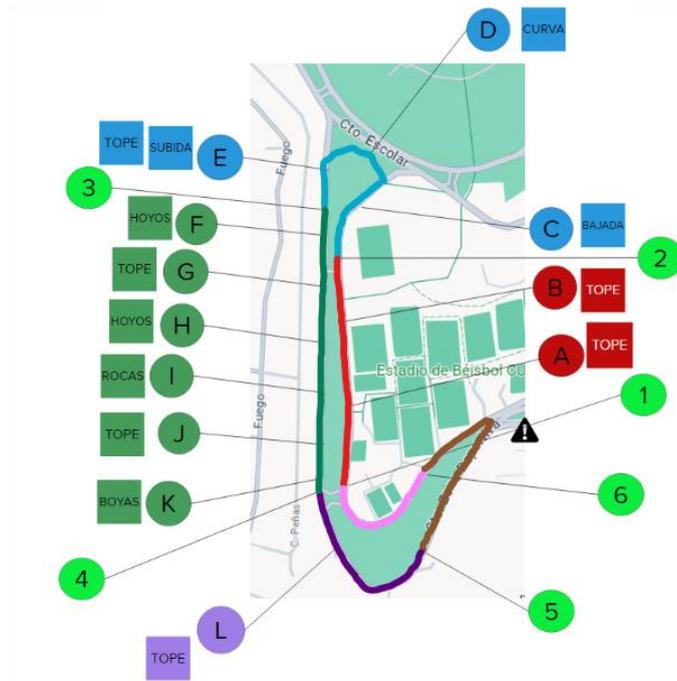


Figura B.13 – Pista creada 2

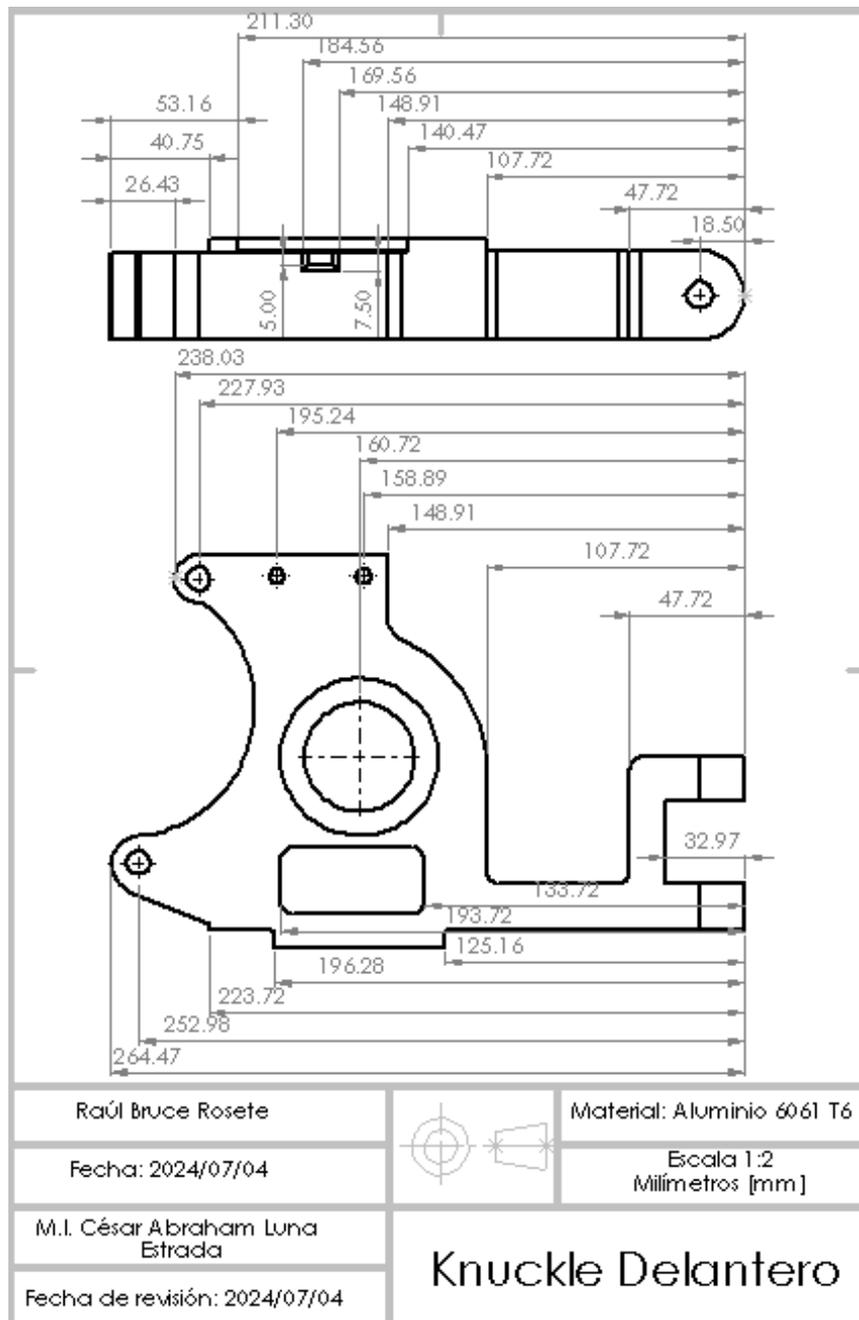
En dónde tenemos que:

PRUEBAS	REGIÓN QUE ABARCA	COLOR DE LA REGIÓN	ELEMENTOS NATURALES DE LA PISTA	ELEMENTOS EXTERNOS PARA LA PRUEBA
SUSPENSIÓN	INICIO: Punto 1 FIN: Punto 2	ROJO	2 Topes	Rampas, Llantas
MANIOBRABILIDAD	INICIO: Punto 2 FIN: Punto 3	AZUL	Bajadas, Subidas, Curvas y 1 Tope	Conos, Llantas
SUSPENSIÓN	INICIO: Punto 3 FIN: Punto 4	VERDE	2 Hoyos, 2 Topes, 1 Roca y 1 Zona de Bolas Metálicas	Rampas, Llantas
MANIOBRABILIDAD	INICIO: Punto 4 FIN: Punto 5	MORADO	1 Tope	Conos, Llantas
ARRASTRE	INICIO: Punto 5 FIN: Punto 6	CAFÉ	Nada	2 Camionetas
MANIOBRABILIDAD	INICIO: Punto 6 FIN: Punto 1	ROSA	Nada	Conos, Llantas

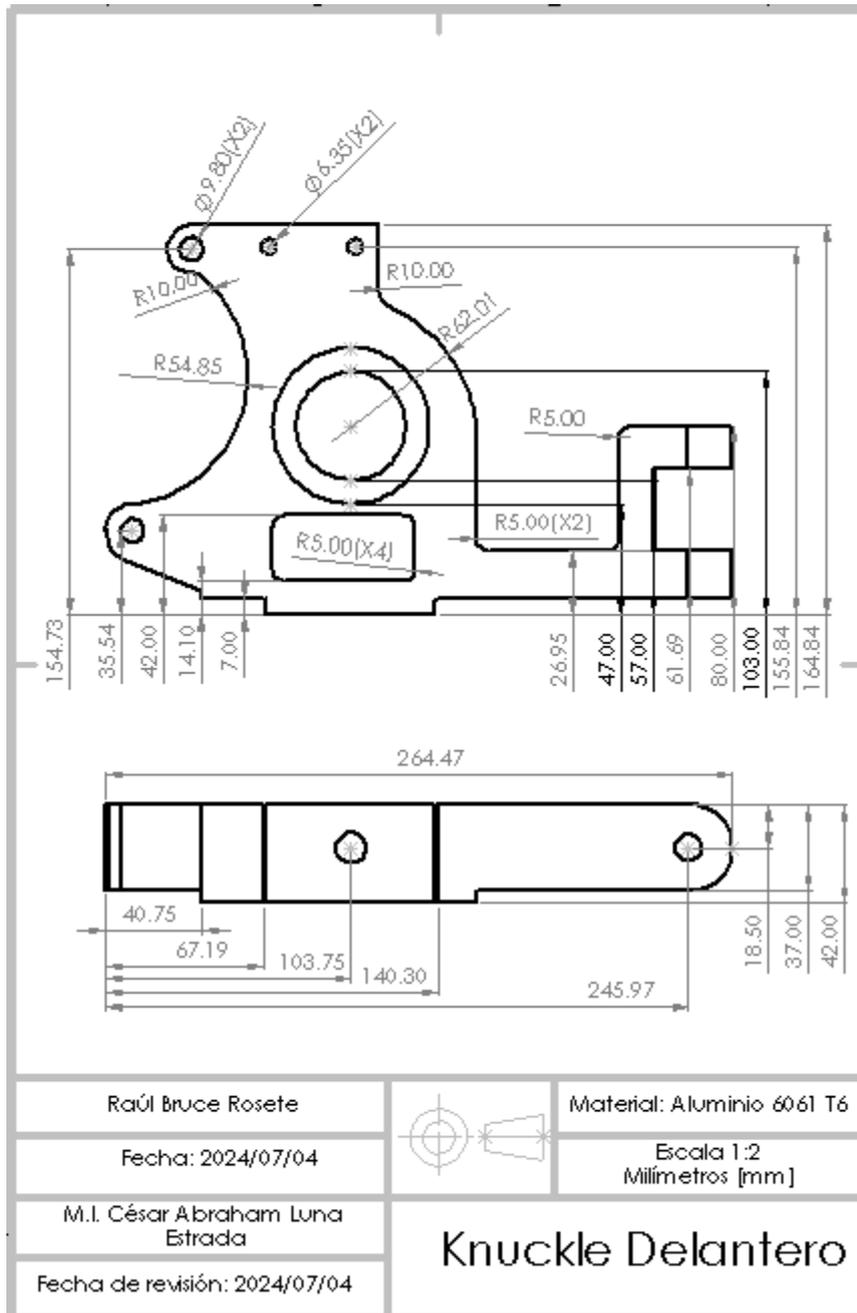
Figura B.14 - Resumen de la Pista creada 2

# Anexo C: Planos de ambos Knuckles

## *C. I. Planos del Knuckle Delantero*



**Figura C.1 – Plano 1 Knuckle Delantero**



**Figura C.2 – Plano 2 Knuckle Delantero**

## C. II. Planos del Knuckle Trasero

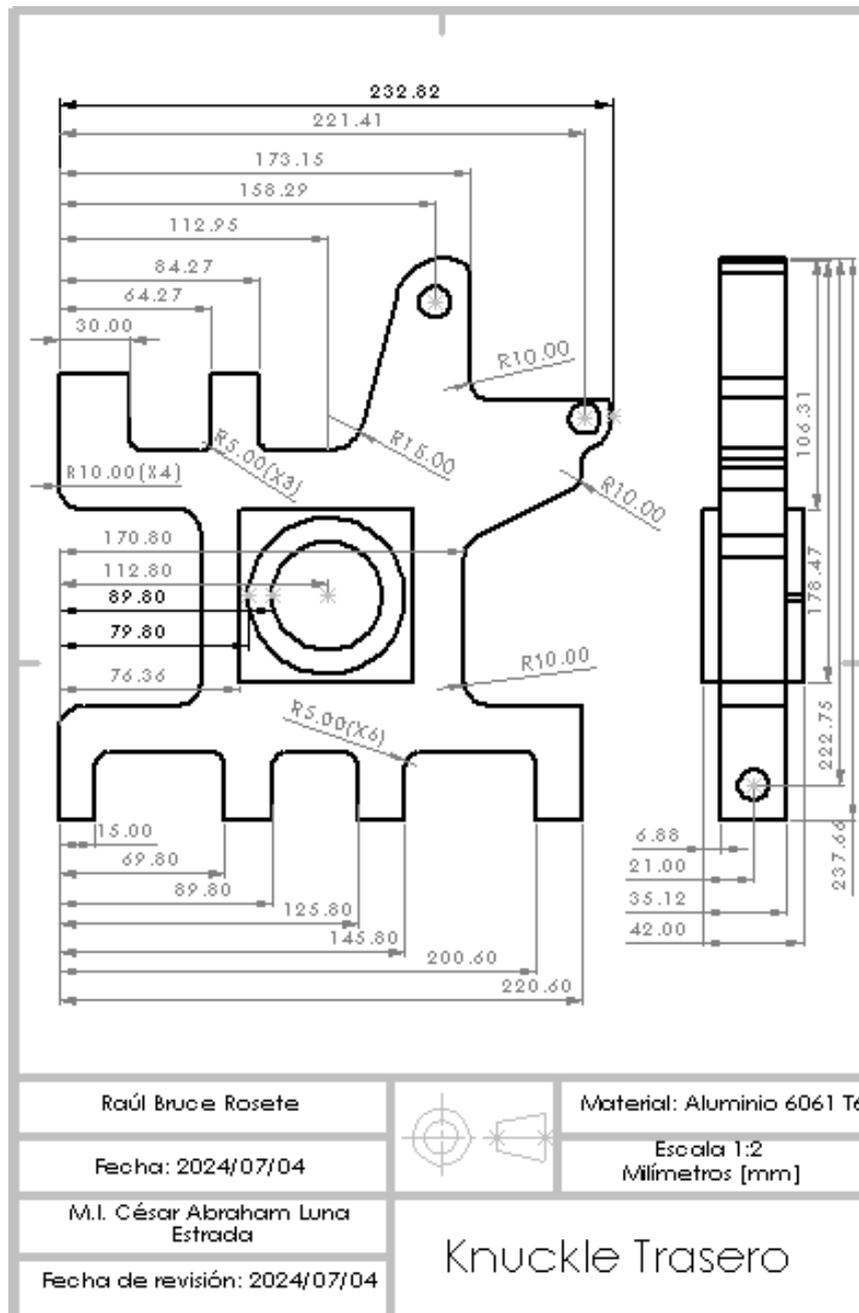
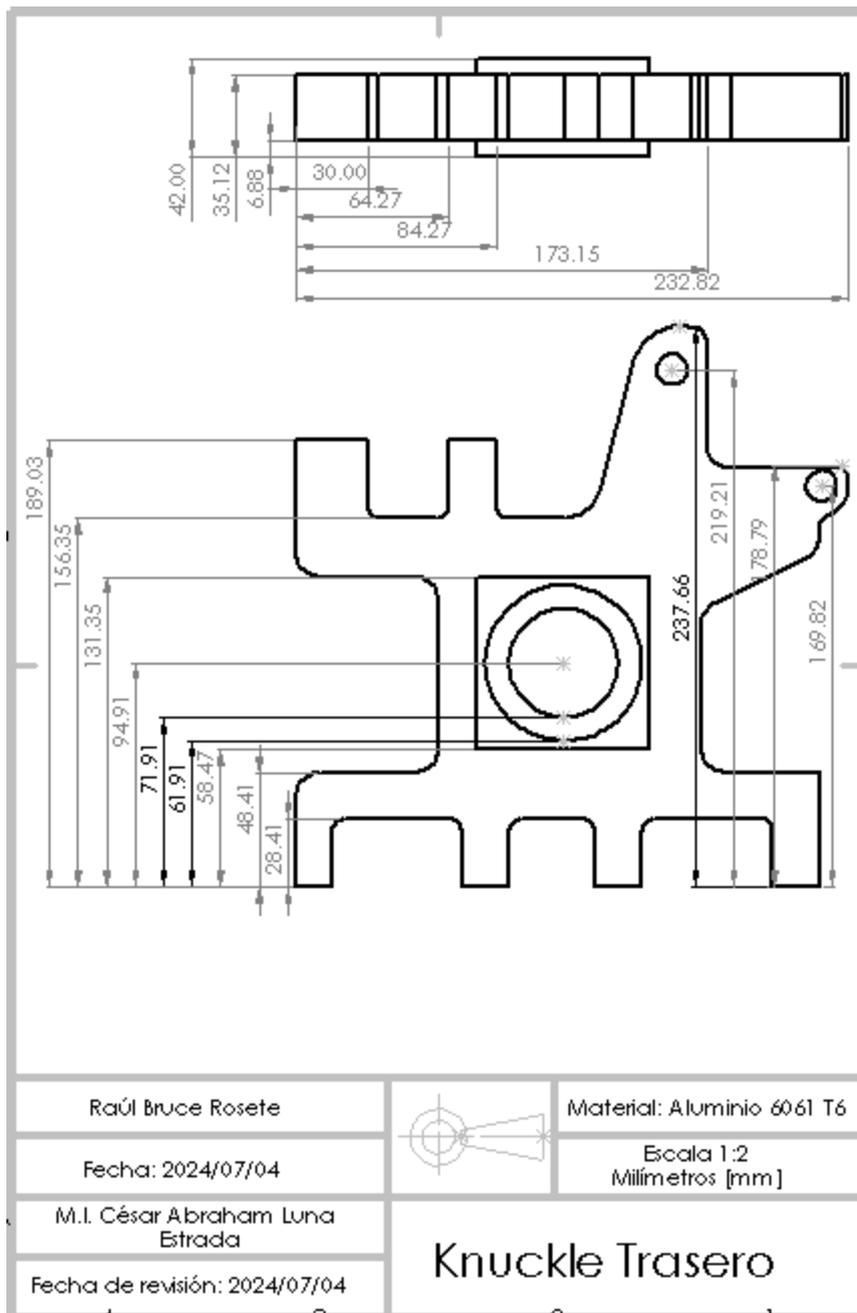


Figura C.3 – Plano 1 Knuckle Trasero



**Figura C.4 – Plano 2 Knuckle Trasero**

# Anexo D: Proceso de Manufactura del

## Knuckle Delantero

### *D. I. Proceso de Manufactura del Knuckle Delantero*

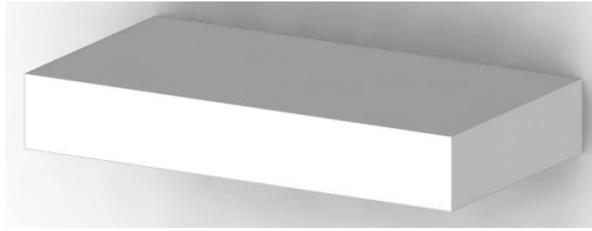
#### *D.I. I. Paso 1- Comprar Material*

##### D.I.I. I. Máquinas, herramienta y Equipo de Seguridad

- Guantes de Carnaza
  - Para evitar cortaduras o entierro de viruta en las manos al agarrar la solera
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón

##### D.I.I. II. Descripción del Paso

Comprar una solera con las dimensiones especificadas en la **Figura D.1**; recordando que el espesor de las soleras se pide en pulgadas en vez de milímetros; en caso de no encontrar, proceder al siguiente espesor comercial accesible que son 2 [in] de Aluminio 6061 T6.



**Figura D.1** – Solera de 280 [mm] x 180 [mm] x 1  $\frac{3}{4}$  [in] de Aluminio 6061 T6

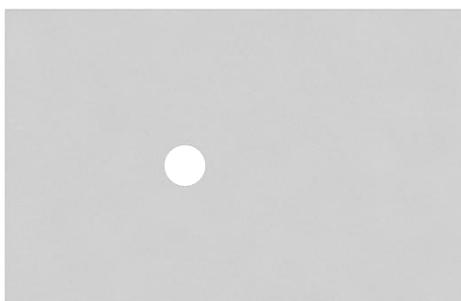
## *D.I. II. Paso 2- Generar barreno inicial*

### D.I.II. I. Máquinas, herramientas y Equipo de Seguridad

- CNC de 3 ejes
  - Broca de 1 [in] diámetro por 50 [mm] de largo (mínimo) de *HSS*
- Guantes de Carnaza
  - Para evitar cortaduras o entierro de viruta en las manos al agarrar la solera
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón

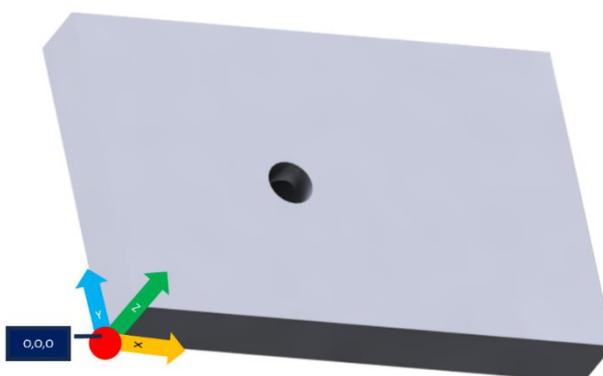
### D.I.II. II. Descripción del Paso

Colocar la solera antes comprada en la máquina CNC de 3 ejes, y usar una broca de 1" para generar un barreno que atravesase toda la solera, y cuyo centro coincida exactamente con el centro del Barreno para el Rodamiento viendo al Knuckle desde su vista Frontal. Este barreno es para poder permitir que entre la fresa cuadrada a remover el material y darle la forma requerida. El resultado de este paso se observa en la **Figura D.2**.



**Figura D.2** – Paso 2: Generando el Barreno Inicial en la Solera

Es importante recalcar, que la programación CNC se basa en posiciones, para las cuales, hay que definir un origen, y toda la manufactura (las posiciones de la herramienta) deben ser programadas respecto a ese origen. Como ejemplo, se marcará este punto en la esquina inferior izquierda, lo cual se podrá observar en la **Figura D.3**:



**Figura D.3** – Punto de Origen (0,0,0) para definir la programación de la máquina CNC

**Nota:** Este paso es “opcional” debido a que la fresa cuadrada se puede usar como broca en caso de no contar con dicha broca, sin embargo, hacer esto no se considera como una “buena práctica” de manufactura puesto que requiere un poco de habilidad para no fracturar la fresa, por lo cual se recomienda realizar esto primero. Otra cuestión, es que no es necesario que sea 1” exactamente, sólo que sea mayor (no igual, de hecho, entre mayor sea, mejor) a los 10 [mm] de diámetro de la fresa cuadrada usada en el siguiente paso.

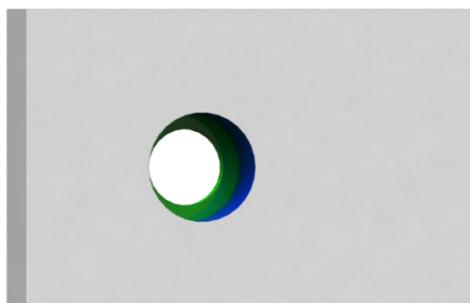
## *D.I. III. Paso 3 – Manufacturar barreno para el rodamiento*

### D.I.III. I. Máquinas, herramienta y Equipo de Seguridad

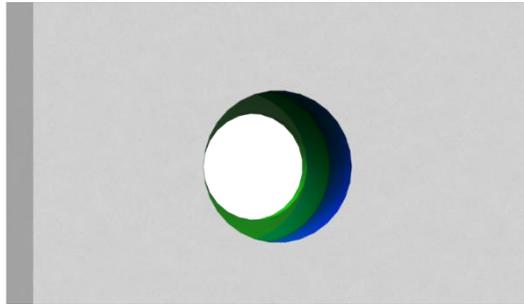
- CNC de 3 ejes
  - Fresa Cuadrada de 10 [mm] diámetro por 55 [mm] de largo (mínimo) de  $H$
- Guantes de Carnaza
  - Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al cambiar la herramienta
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón

### D.I.III. II. Descripción del Paso

Ahora que tenemos nuestro barreno, cambiamos la herramienta de la broca de 1" a la fresa cuadrada de 10 [mm] de diámetro para generar la geometría completa de lo que corresponderá al Barreno para el Rodamiento (en **Azul**), y la Tapa del Rodamiento (en **Verde**), lo cual se vería como muestra la **Figura DÑ4**:



**Figura D.4** – Barreno para el Rodamiento y Tapa del Rodamiento manufacturados



**Figura D.5** – Barreno para el Rodamiento y Tapa del Rodamiento manufacturados (acercamiento)

## *D.I. IV. Paso 4 – Eliminar material sobrante de la solera*

### D.I.IV. I. Máquinas, herramienta y Equipo de Seguridad

- CNC de 3 ejes
  - Fresa Cuadrada de 10 [mm] diámetro por 55 [mm] de largo (mínimo) de *HSS*
- Guantes de Carnaza
  - Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al voltear la Solera
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón

### D.I.IV. II. Descripción del Paso

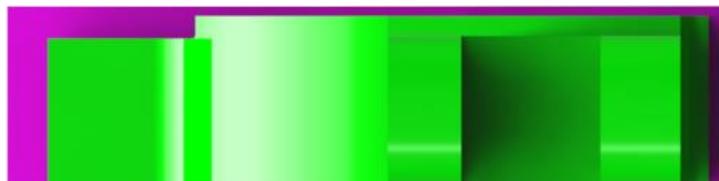
Ya con el Barreno para el Rodamiento y su Tapa manufacturados, volteamos la solera de manera que la rotación sólo ocurra con respecto a nuestro Eje Y

(en las **Figuras D.3** y **D.6**, se indica cuál es el Eje Y para nuestra pieza). Debido a que el Origen (0,0,0) es un punto definido en la máquina, pero la máquina como tal no se rota ni se mueve, cuando volteemos la solera el punto de origen seguirá en la esquina inferior izquierda, pero el barreno generado en el paso anterior se observa movido hacia la derecha, como se observa en la **Figura D.6**, lo cual es importante ya que hay que recordar que la programación de una máquina CNC estará en función del punto de Origen definido:

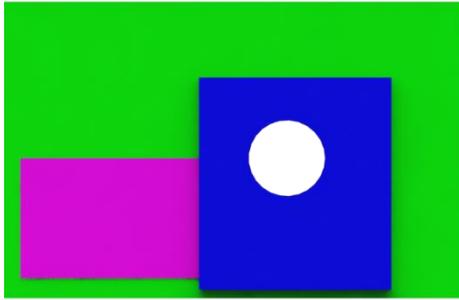


**Figura D.6** – Punto de Origen (0,0,0) para definir la programación de la máquina CNC tras voltear la Solera

En la **Figura D.7**, podemos observar en **Morado** lo que corresponde al material de la Solera, y en **Verde** el material que corresponde al Knuckle, por lo cual, usando la fresa cuadrada de 10 [mm] de diámetro, se removerá el material sobrante de manera que cada región del Knuckle tenga su espesor final, como se observa en la **Figura D.8**, donde la región en **Verde**, tiene el espesor que corresponde a las áreas del Portacaliper, y del Soporte de la Ball Joint, la región en **Morado** tiene un espesor diferente, que corresponde al de la Pestaña de la Dirección, y la región en **Azul**, tiene un valor de espesor que corresponde al Cuerpo del Knuckle:



**Figura D.7** – Visualización Lateral donde se observa, en Verde, la cantidad de material que corresponde al Knuckle, y en Morado, el material de la Solera original



**Figura D.8** – Visualización de las 3 zonas con diferente espesor en la Solera

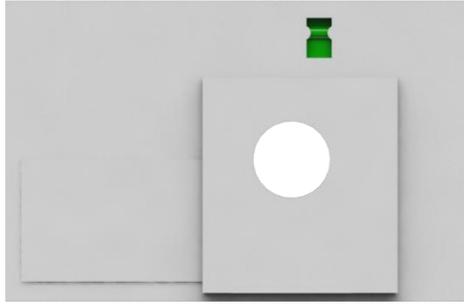
## *D.I. V. Paso 5 – Generar el soporte para el Ball Joint*

### D.I.V. I. Máquinas y herramientas y Equipo de Seguridad

- CNC de 3 ejes
  - Cortador de Bola de 1/32 [in] diámetro por 55 [mm] de largo (mínimo) de *HSS*
- Guantes de Carnaza
  - Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al cambiar la herramienta
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón

### D.I.V. II. Descripción del Paso

Ahora que tenemos el espesor deseado en cada sección, cambiamos la fresa cuadrada por un cortador de bola de 1/32 [in] para generar el soporte de la Ball Joint (región en Verde), como se observa en la **Figura D.9**:



**Figura D.9** – Manufactura del Soporte para la Ball Joint

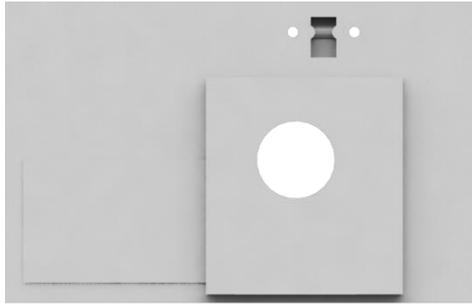
## *D.I. VI. Paso 6 – Barrenar para Tapa del Knuckle*

### D.I.VI. I. Máquinas y herramientas por usar

- CNC de 3 ejes
  - Broca de 7 [mm] diámetro por 55 [mm] de largo (mínimo) de *HSS*
- Guantes de Carnaza
  - Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al cambiar la herramienta
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón

### D.I.VI. II. Descripción del Paso

Cambiar el cortador de bola por una broca de 7 [mm] de diámetro para realizar los dos barrenos que funcionarán como la cuerda para unir la Tapa del Knuckle al Knuckle. Dichos barrenos se observan en la **Figura C.10**:



**Figura D.10** – Solera con barrenos para Tapa del Knuckle realizados

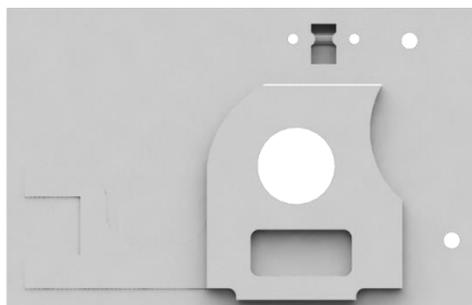
## *D.I. VII. Paso 7 – Barrenar para Portacaliper*

### D.I.VII. I. Máquinas y herramientas por usar

- CNC de 3 ejes
  - Broca de 25/64 [in] diámetro por 55 [mm] de largo (mínimo) de *HSS*
- Guantes de Carnaza
- Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al cambiar la herramienta
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón

### D.I.VII. II. Descripción del Paso

Cambiar la broca de 7 [mm] por otra de 25/64 [in] de diámetro, y generar los barrenos que servirán para sujetar al Cáliper. Estos barrenos se observan en la **Figura D.11**:



**Figura D.11** – Solera con barrenos para Portacaliper realizados

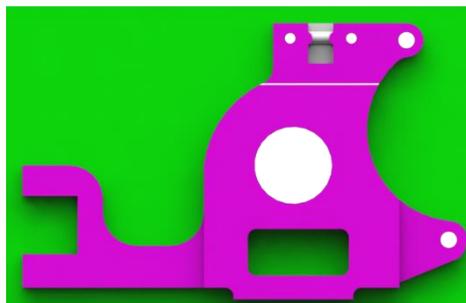
## *D.I. VIII. Paso 8 – Generar Geometría Externa*

### D.I.VIII. I. Máquinas, herramienta y Equipo de Seguridad

- CNC de 3 ejes
  - Fresa Cuadrada de 10 [mm] de diámetro por 55 [mm] de largo (mínimo) de HSS
- Guantes de Carnaza
  - Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al cambiar la herramienta
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón

### D.I.VIII. II. Descripción del Paso

Cambiar la broca de 25/64 [in] por una fresa cuadrada de 10 [mm] de diámetro para eliminar todo el material sobrante, dándole la forma final al Knuckle. En la **Figura D.12** se observa en **Morado** la geometría del Knuckle, y en **Verde** el material sobrante de la solera que se removerá con la fresa cuadrada:



**Figura D.12** – Removiendo material sobrante de la Solera para darle la Geometría Externa al Knuckle Delantero

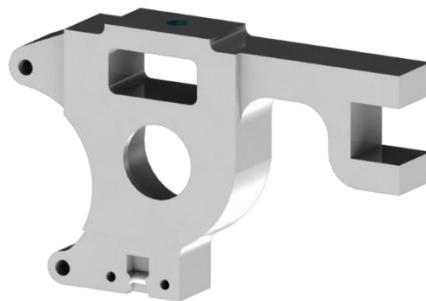
## D.I. IX. Paso 9 – Barrenar para Brazo Tipo A Inferior

### D.I.IX. I. Máquinas y herramientas por usar

- Fresadora Vertical manual ó Taladro de Columna:
  - Broca de 15/32 [in] de diámetro por 15 [mm] de largo (mínimo) de *HS*
- Guantes de Carnaza
  - Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al mover la Solera y colocar la herramienta
  - Se deben remover al usar la Fresadora Vertical ó el Taladro de Columna para evitar que se atoren con la herramienta girand
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón
- Lentes de Seguridad

### D.I.IX. II. Descripción del Paso

Desmontar la pieza del CNC de 3 ejes, y colocar el Knuckle en la Fresadora Vertical manual, o en el Taladro de Columna, de manera que el soporte de la Ball Joint quede hacia abajo. Generar un barreno de 15/32 [in] de diámetro en la cara inferior del Knuckle tal como se muestra en la **Figura D.13**.



**Figura D.13** – Knuckle con soporte para Ball Joint hacia abajo, y con barreno para Brazo Tipo A Inferior realizado



**Figura D.14** – Acercamiento al barreno para Brazo Tipo A Inferior para mejor visualización

## *D.I. X. Paso 10 – Barrenar para Bieleta de la Dirección*

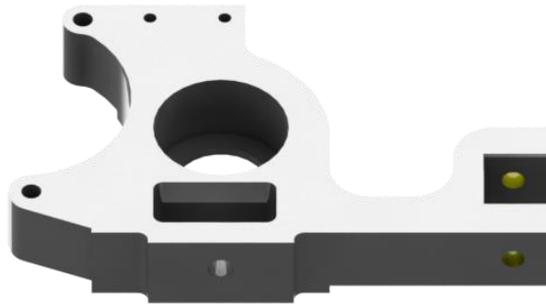
### D.I.X. I. Máquinas, herramienta y Equipo de Seguridad

- Fresadora Vertical manual ó Taladro de Columna:
  - Broca de 7/16 [in] de diámetro por 75 [mm] de largo (mínimo) de *HS*
- Guantes de Carnaza
  - Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al mover la Solera y colocar la herramienta
  - Se deben remover al usar la Fresadora Vertical ó el Taladro de Columna para evitar que se atoren con la herramienta girando
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón
- Lentes de Seguridad

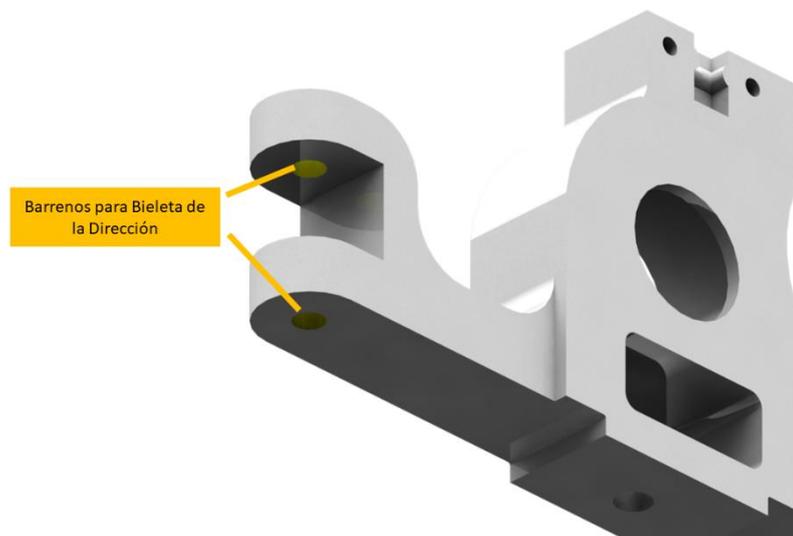
### D.I.X. II. Descripción del Paso

Desmontar el Knuckle, y colocarlo en la Fresadora Vertical manual, o en el Taladro de Columna, de manera que el soporte de la Ball Joint quede hacia arriba. Generar un barreno de 7/16 [in] de diámetro en la Pestaña de la

Dirección que atraviese tanto la pestaña superior, como la inferior, tal como se observa en la **Figura D.15**:



**Figura D.15** - Knuckle con soporte para Ball Joint hacia arriba, y con barrenos para Bieleta de la Dirección realizados



**Figura D.16** – Acercamiento a los barrenos para la Bieleta de la Dirección para mejor visualización

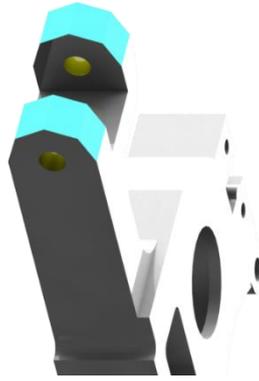
## *D.I. XI. Paso 11 – Corregir Pestaña de la Dirección*

### D.I.XI. I. Máquinas y herramientas por usar

- Fresadora Vertical manual:
  - Fresa Cuadrada de 10 [mm] de diámetro por 55 [mm] de largo (mínimo) de *HSS*
- Guantes de Carnaza
- Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al mover la Solera y colocar la herramienta
- Se deben remover al usar la Fresadora Vertical ó el Taladro de Columna para evitar que se atoren con la herramienta girando
- Botas de Seguridad
- Por si se cae algún elemento
- Bata de algodón
- Para evitar que se rasgue la ropa de quien esté manufacturando
- Lentes de Seguridad
- Para evitar que la viruta salte a los ojos del operador

### D.I.X. II. Descripción del Paso

Colocar el Knuckle en la Fresadora Vertical manual, montando la fresa cuadrada de 10 [mm] de diámetro en su respectivo portaherramientas. Usar las manivelas para generar la mitad de un octágono en las pestañas superior e inferior como se observa en la **Figura D.17**:



**Figura D.17** – Geometría Hexagonal en Pestaña de la Dirección



**Figura D.18** – Geometría Hexagonal en Pestaña de la Dirección (Vista Superior)

## *D.I. XII. Paso 12 – Limpieza post-manufactura del Knuckle*

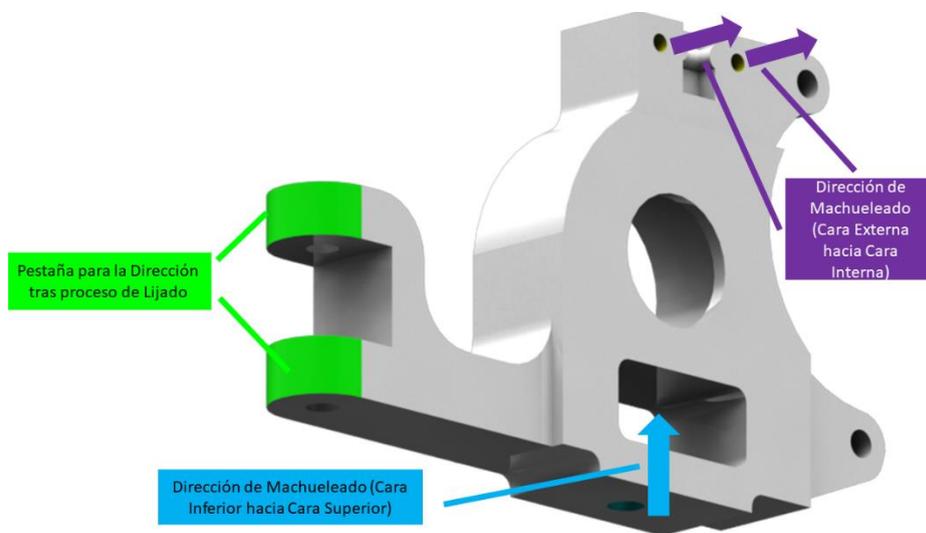
### D.I.X. I. Máquinas, herramienta y Equipo de Seguridad

- Lima plana
- Maneral para Machuelo de ¼"
- Machuelo de ¼ [in]
- Machuelo de 7/16 [in]
- Guantes de Carnaza
  - Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al agarrar la Solera

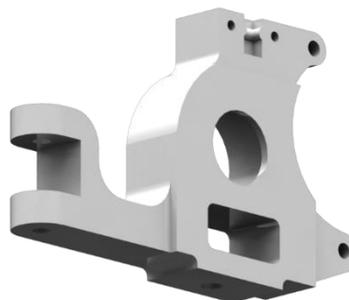
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón

## D.II.X. II. Descripción del Paso

Remover el Knuckle de la Fresadora Vertical manual, y usar una lima en todos los filos que hayan quedado en la pieza para evitar futuros accidentes. Además, usar la lima para darle curvatura al hexágono realizado en el **Paso 11**. En los barrenos de la Tapa para el Knuckle, y en el Barreno para el Brazo A Inferior, usar un Machuelo de  $x''$  y de  $x''$  respectivamente, para hacerles la cuerda en la dirección de las flechas que se observan en la **Figura D.19**:



**Figura D.19** – Descripción del Paso 12



**Figura D.20** – Visualización Final del Knuckle Delantero tras manufactura

## *D. II. Proceso de Manufactura del Knuckle*

### *Trasero*

#### *D.II. I. Paso 1- Comprar Material*

##### *D.II.I. I. Máquinas y herramientas por usar*

- Guantes de Carnaza
- Para evitar cortaduras o entierro de viruta en las manos al agarrar la solera
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón

##### *D.II.I. II. Descripción del Paso*

Comprar una solera de 250 [mm] de ancho x 255 [mm] de alto x 44.45 [mm] de ancho (recordando que el espesor de las soleras se pide en pulgadas en vez de milímetros, estos 44.45 [mm] equivalen a 1.75 [in]; en caso de no encontrar, proceder al siguiente espesor comercial accesible que son 2 [in]) de Aluminio 6061 T6.



**Figura D.21** – Solera de 250 [mm] x 255 [mm] x 1 ¾ [in] de Aluminio 6061 T6

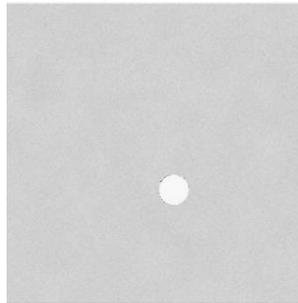
## *D.II. II. Paso 2- Generar barreno inicial*

### D.II.II. I. Máquinas, herramientas y Equipo de Seguridad

- CNC de 3 ejes
  - Broca de 1 [in] diámetro por 50 [mm] de largo (mínimo) de HSS
- Guantes de Carnaza
- Para evitar cortaduras o entierro de viruta en las manos al agarrar la solera
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón

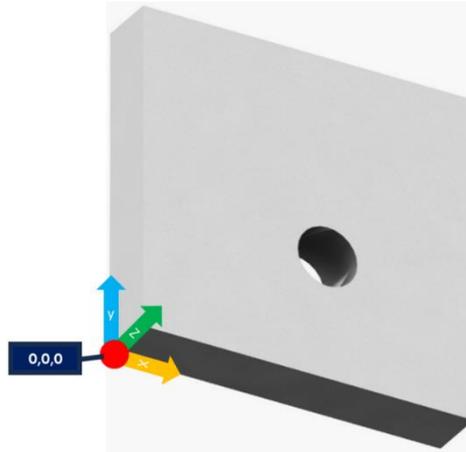
### D.II.II. II. Descripción del Paso

Colocar la solera antes comprada en la máquina CNC de 3 ejes, y usar una broca de 1" para generar un barreno que atraviese toda la solera, y cuyo centro coincida exactamente con el centro del Barreno para el Rodamiento viendo al Knuckle desde su vista Trasera. Este barreno es para poder permitir que entre la fresa cuadrada a remover el material y darle la forma requerida. El resultado de este paso se observa en la **Figura D.22**.



**Figura D.22** – Paso 2: Generando el Barreno Inicial en la Solera

Es importante recalcar, que la programación CNC se basa en posiciones, para las cuales, hay que definir un origen, y toda la manufactura (las posiciones de la herramienta) deben ser programadas respecto a ese origen. Como ejemplo, se marcará este punto en la esquina inferior izquierda, lo cual se podrá observar en la **Figura D.23**:



**Figura D.23** – Punto de Origen (0,0,0) para definir la programación de la máquina CNC

**Nota:** Este paso es “opcional” debido a que la fresa cuadrada se puede usar como broca en caso de no contar con dicha broca, sin embargo, hacer esto no se considera como una “buena práctica” de manufactura puesto que requiere un poco de habilidad para no fracturar la fresa, por lo cual se recomienda realizar esto primero. Otra cuestión, es que no es necesario que sea 1” exactamente, sólo que sea mayor (no igual, de hecho, entre mayor sea, mejor) a los 10 [mm] de diámetro de la fresa cuadrada usada en el siguiente paso.

## *D.II. III. Paso 3 – Manufacturar barreno para el rodamiento*

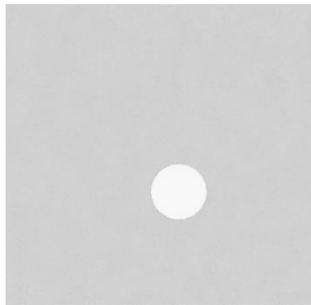
### **D.II.III. I. Máquinas, herramientas y Equipo de Seguridad**

- CNC de 3 ejes
  - Fresa Cuadrada de 10 [mm] diámetro por 55 [mm] de largo (mínimo) de HSS
- Guantes de Carnaza

- Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al cambiar la herramienta
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón

### D.II.III. II. Descripción del Paso

Usar la Fresa Cuadrada para llevar el barreno generado en el **Paso 2** de un diámetro de 1 [in] a 46 [mm], como se observa en la **Figura D.24**:



**Figura D.24** – Barreno para el Rodamiento manufacturado

## *D.II. IV. Paso 4 – Eliminar material sobrante de la solera (Cara Trasera)*

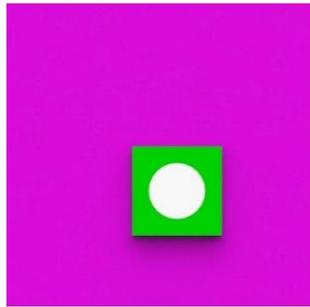
### D.II.IV. I. Máquinas, herramientas y Equipo de Seguridad

- CNC de 3 ejes
  - Fresa Cuadrada de 10 [mm] diámetro por 55 [mm] de largo (mínimo) de HSS
- Guantes de Carnaza
- Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al voltear la Solera
- Botas de Seguridad

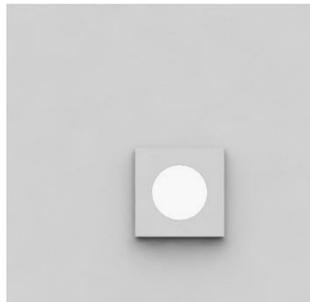
- Bata de algodón

## D.II.IV. II. Descripción del Paso

Remover el material sobrante en el eje Z dependiendo de lo requerido en cada sección de la solera. En la **Figura D.25** se observa en Verde, una sección que tendrá un espesor definido, y en Morado toda el área de la solera que tendrá un espesor diferente:



**Figura D.25** – Regiones con diferentes espesores Cara Trasera del Knuckle



**Figura D.26** – Vista final de la solera manufacturada por la Cara Trasera

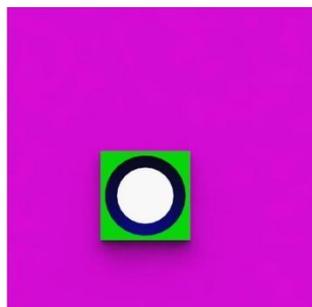
## *D.II. V. Paso 5 – Eliminar material sobrante de la solera (Cara Delantera)*

### **D.II.V. I. Máquinas, herramientas y Equipo de Seguridad**

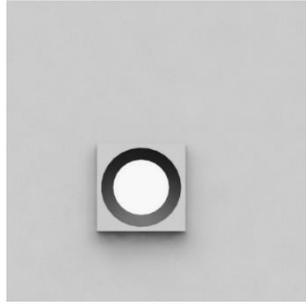
- CNC de 3 ejes
  - Broca de x [in] diámetro por 55 [mm] de largo (mínimo) de *HSS*
- Guantes de Carnaza
  - Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al cambiar la herramienta
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón

### **D.II.V. II. Descripción del Paso**

Remover la Solera de la máquina CNC, rotar la pieza 180° respecto al eje Y (eje marcado en **Figura D.23**), y volver a montar en la máquina CNC de 3 ejes. Remover el material sobrante en el eje Z dependiendo de lo requerido en cada sección de la solera. En la **Figura D.27** se observa en **Verde**, una sección que tendrá un espesor definido, en **Morado** toda el área de la solera que tendrá un espesor diferente, y en **Azul** el área que corresponde al Barreno del Rodamiento, por lo que también tendrá un espesor diferente:

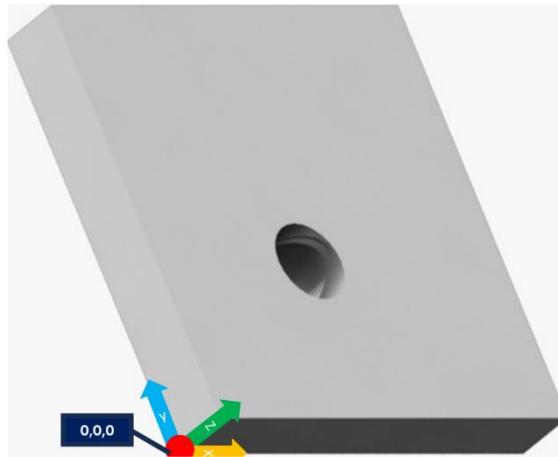


**Figura D.27** – Regiones con diferentes espesores Cara Delantera del Knuckle



**Figura D.28** – Vista final de la solera manufacturada por la Cara Delantera

Recordando que el punto de origen no se mueve al rotar la pieza debido a que es un punto de la máquina, entonces tenemos que nuestro origen es:



**Figura D.29** – Origen (punto 0,0,0) para la programación de la máquina CNC tras rotar la solera

## *D.II. VI. Paso 6 – Barrenar Portacaliper*

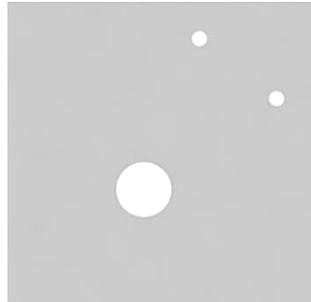
### **D.II.VI. I. Máquinas y herramientas por usar**

- CNC de 3 ejes
  - Broca de 25/64 [in] diámetro por 55 [mm] de largo (mínimo) de *HSS*
- Guantes de Carnaza

- Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al cambiar la herramienta
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón

## D.II.VI. II. Descripción del Paso

Desmontar el Knuckle, y colocarlo en la Fresadora Vertical manual, o en el Taladro de Columna, de manera que el soporte de la Ball Joint quede hacia arriba. Generar un barreno de 25/64 [in] de diámetro en la Pestaña de la Dirección que atraviese tanto la pestaña superior, como la inferior, tal como se observa en la **Figura D.30**:



**Figura D.30** – Solera con barrenos para Portacaliper

## *D.II. VII. Paso 7 – Generar Geometría Externa*

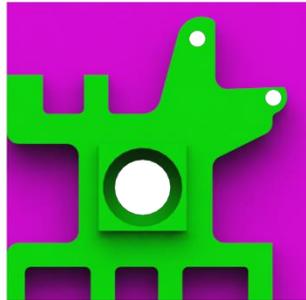
### D.II.VII. I. Máquinas, herramientas y Equipo de Seguridad

- CNC de 3 ejes
  - Fresa Cuadrada de 10 [mm] de diámetro por 55 [mm] de largo (mínimo) de HSS
- Guantes de Carnaza
  - Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al cambiar la herramienta

- Botas de Seguridad
- Bata de algodón

## D.II.VII. II. Descripción del Paso

Eliminar todo el material sobrante, dándole la forma final al Knuckle. En la **Figura D.31** se observa en Verde la geometría del Knuckle, y en Morado el material sobrante de la solera que se removerá con la fresa cuadrada:



**Figura D.31** – Geometría Externa del Knuckle Trasero

## *D.II. VIII. Paso 8 – Barrenar Pestañas para Brazo Seguidor*

### D.II.VIII. I. Máquinas, herramientas y Equipo de Seguridad

- Fresadora Vertical manual ó Taladro de Columna:
  - Broca de 7/16 [mm] de diámetro por 95 [mm] de largo (mínimo) de HSS
- Guantes de Carnaza
- Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al mover la Solera y colocar la herramienta
- Se deben remover al usar la Fresadora Vertical ó el Taladro de Columna para evitar que se atoren con la herramienta girando

- Botas de Seguridad
- Bata de algodón
- Lentes de Seguridad

## D.II.VIII. II. Descripción del Paso

Desmontar la pieza del CNC de 3 ejes, y colocar el Knuckle en la Fresadora Vertical manual, o en el Taladro de Columna, de manera que el Portacaliper quede hacia abajo. Generar un barreno de 7/16 [in] de diámetro en las pestañas superiores del Knuckle tal como se muestra en la **Figura D.32**.



**Figura D.32** – Knuckle con Barrenos para Brazo Seguidor

## *D.II. IX. Paso 9 – Barrenar Pestañas para Brazo H*

### D.II.IX. I. Máquinas y herramientas por usar

- Fresadora Vertical manual ó Taladro de Columna:
  - Broca de 7/16 [in] de diámetro por 95 [mm] de largo (mínimo) de HSS

- Guantes de Carnaza
  - Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al mover la Solera y colocar la herramienta
  - Se deben remover al usar la Fresadora Vertical ó el Taladro de Columna para evitar que se atoren con la herramienta girando
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón
- Lentes de Seguridad

## D.II.IX. II. Descripción del Paso

Generar barrenos de 7/16 [in] de diámetro en las dos primeras pestañas del Brazo H, tal como se observa en la **Figura D.33**. Posteriormente, desmontar el Knuckle y darle la vuelta de manera que el Portacaliper quede hacia arriba (apuntando hacia la broca), y realizar barrenos de 7/16 [in] de diámetro en las dos pestañas restantes del Brazo H, tal como se observa en la **Figura D.34**:



**Figura D.33** – Knuckle con dos Barrenos para el Brazo H



**Figura D.34** – Knuckle con últimos dos Barrenos para el Brazo H

*D.II. X. Paso 10 – Limpieza post-manufactura del Knuckle*

D.II.X. I. Máquinas y herramientas por usar

- Lima plana
- Guantes de Carnaza
  - Para evitar cortaduras, quemaduras o entierro de viruta en las manos al agarrar la Solera
- Botas de Seguridad
- Bata de algodón

D.II.X. II. Descripción del Paso

Remover el Knuckle de la Fresadora Vertical manual, y usar una lima en todos los filos que hayan quedado en la pieza para evitar futuros accidentes.

# Anexo E: Obtención de Frecuencias de la pista de C.U.

## *E. I. Pistas*

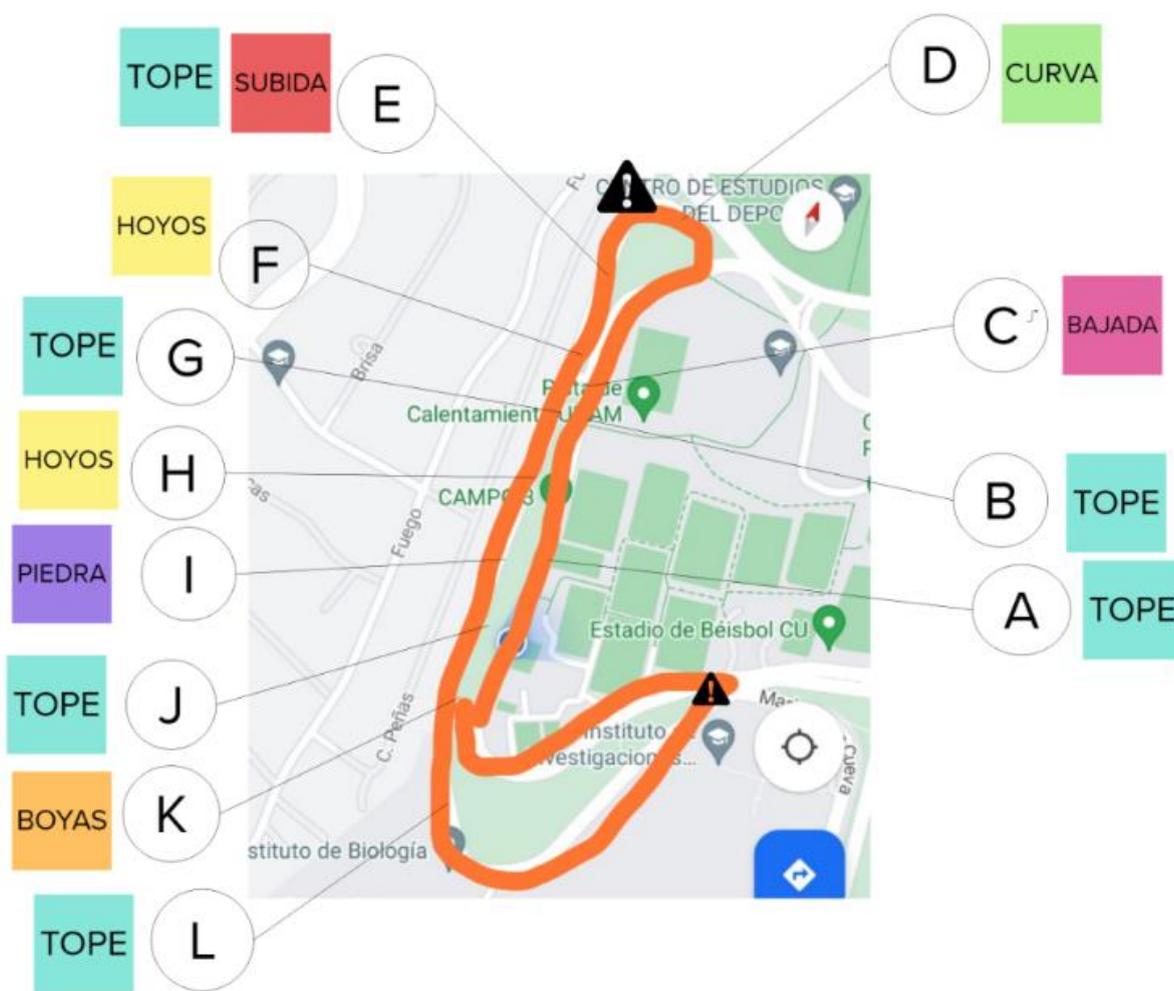


Figura E.1 – Pista pequeña de C.U.



Figura E.2 – Pista grande de C.U.

***E. II. Obtención de Frecuencias – Pista pequeña en C.U. – Pavimento Mojado (Lluvia)***

# Anexo E: Obtención de Frecuencias Principales

## Pista pequeña en C.U. - Pavimento Mojado (Lluvia)

---

### Paso 1 - Importar Datos

```
In[52]-> ListaDatos =  
    Import["C:\\Users\\raul1\\Documents\\Titulacion\\2024-06-30\\AceleracionesReales\\  
    |importa |constante  
    PistaPequena-Lluvia.csv"];  
  
In[53]-> Dimensions[ListaDatos];  
    |dimensiones
```

---

### Paso 2 - Obtener Aceleraciones en Z (vertical) y Tiempo

```
In[54]-> AcelsZ = ListaDatos[[All, 4];  
    |todo  
  
In[55]-> Tiempos = ListaDatos[[All, 1];  
    |todo  
  
In[56]-> FrecuenciaMuestreo = 500 (*Hz*);
```

---

### Paso 3 - Realizar la Transformada de Fourier Rápida (FFT)

```
In[57]-> LimpiezaAcelsZ = Select[AcelsZ, NumericQ];  
    |selecciona |expresión nur  
  
In[58]-> FFTAcelsZ = Fourier[LimpiezaAcelsZ];  
    |transformada de Fourier discreta
```

**Figura E.3** – Pista pequeña de C.U. – Pavimento Mojado (Lluvia) – Pasos 1 al 3

---

## Paso 4 - Obtener Frecuencias

```
In[59]:= NumAcelsZ = Length[AceIsZ];  
          |longitud  
In[60]:= Frecuencias = Table[i * FrecuenciaMuestreo / NumAcelsZ, {i, 0, NumAcelsZ}] // N;  
          |tabla |val
```

---

## Paso 5 - Graficar Frecuencias vs Magnitud del Espectro

```
In[61]:= Magnitud = Abs[FFTAceIsZ];  
          |valor absoluto  
In[62]:= Length[Tiempos];  
          |longitud  
In[63]:= TiempoMuestra = Tiempos[[Length[Tiempos]]];  
          |longitud  
In[64]:= Δt = TiempoMuestra / (Length[Tiempos]);  
          |longitud  
In[65]:= Δf = 1 / (Length[Tiempos] * Δt);  
          |longitud  
In[66]:= AmplitudFrecuencia =  
          Table[{i * FrecuenciaMuestreo / NumAcelsZ, Magnitud[[i]]}, {i, 1, Length[Magnitud]}] // N;  
          |tabla |longitud |val  
          (FrecuenciaMuestreo) / (Sqrt[2]) // N;  
          |raíz cuadrada |val  
          353.5533905932738` (*Frecuencia de Nyquist*)  
Out[68]=  
353.553
```

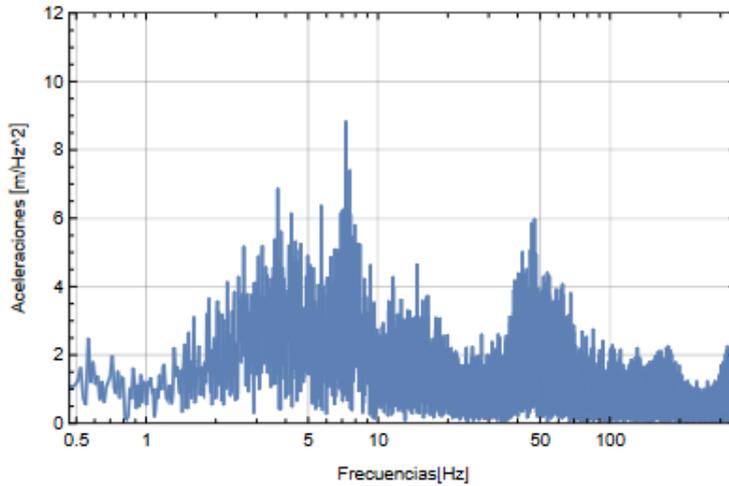
**Figura E.4** – Pista pequeña de C.U. – Pavimento Mojado (Lluvia) – Pasos 4 y 5

```

In[69]:= ListLogLinearPlot[AmplitudFrecuencia,
  representación log lineal de lista
  Joined → True, PlotRange → {{0, 353}, {0, 12}}, Frame → True,
  unido verdadero rango de representación marco verdadero
  FrameLabel → {"Frecuencias [Hz]", "Aceleraciones [m/Hz^2]"}, GridLines → Automatic]
  etiqueta de marco parrilla de líneas automático

```

Out[69]=



```

In[70]:= (Length[Magnitud] * Δf) / (Sqrt[2])
  longitud raíz cuadrada

```

Out[70]=

39.5708

**Figura E.5** – Pista pequeña de C.U. – Pavimento Mojado (Lluvia) – Gráfica de Frecuencias [Hz] vs. Aceleraciones [m/Hz<sup>2</sup>]

## *E. III. Obtención de Frecuencias – Pista pequeña en C.U. – Pavimento Seco*

# Anexo E: Obtención de Frecuencias Principales

## Pista pequeña en C.U. - Pavimento Seco

---

### Paso 1 - Importar Datos

```
In[106]:-  
ListaDatos = Import[  
    |importa  
    "C:\\Users\\raul1\\Documents\\Titulacion\\2024-06-30\\AceleracionesReales\\PistaChica-  
    |constante  
    Seco.csv"];  
  
In[107]:-  
Dimensions[ListaDatos];  
|dimensiones
```

---

### Paso 2 - Obtener Aceleraciones en Z (vertical) y Tiempo

```
In[108]:-  
AcelsZ = ListaDatos[[All, 4];  
    |todo  
  
In[109]:-  
Tiempos = ListaDatos[[All, 1];  
    |todo  
  
In[110]:-  
FrecuenciaMuestreo = 500 (*Hz*);
```

---

### Paso 3 - Realizar la Transformada de Fourier Rápida (FFT)

```
In[111]:-  
LimpiezaAcelsZ = Select[AcelsZ, NumericQ];  
    |selecciona    |expresión nur  
  
In[112]:-  
FFTAcelsZ = Fourier[LimpiezaAcelsZ];  
    |transformada de Fourier discreta
```

---

Figura E.6 – Pista pequeña de C.U. – Pavimento Seco – Pasos 1 al 3

---

## Paso 4 - Obtener Frecuencias

```
In[113]:-  
    NumAcelsZ = Length[AcelsZ];  
                |longitud  
In[114]:-  
    Frecuencias = Table[i * FrecuenciaMuestreo / NumAcelsZ, {i, 0, NumAcelsZ - 1}];  
                |tabla
```

---

## Paso 5 - Graficar Frecuencias vs Magnitud del Espectro

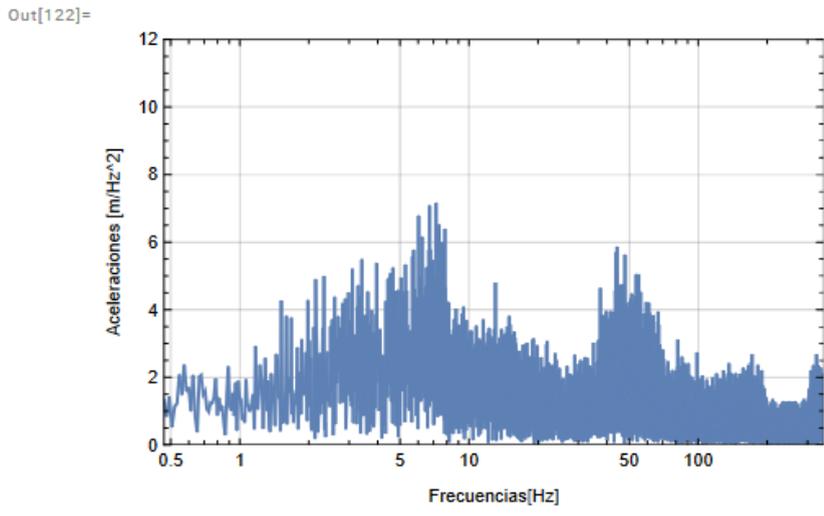
```
In[115]:-  
    Magnitud = Abs[FFTAcelsZ];  
                |valor absoluto  
In[116]:-  
    Length[Tiempos];  
                |longitud  
In[117]:-  
    TiempoMuestra = Tiempos[Length[Tiempos]];  
                |longitud  
In[118]:-  
    Δt = TiempoMuestra / (Length[Tiempos]);  
                |longitud  
In[119]:-  
    Δf = 1 / (Length[Tiempos] * Δt);  
                |longitud  
In[120]:-  
    AmplitudFrecuencia =  
        Table[{i * FrecuenciaMuestreo / NumAcelsZ, Magnitud[[i]]}, {i, 1, Length[Magnitud]}];  
                |tabla |longitud  
In[121]:-  
    (FrecuenciaMuestreo) / (Sqrt[2]);  
                |raíz cuadrada
```

Figura E.7 – Pista pequeña de C.U. – Pavimento Seco – Pasos 4 y 5

```

In[122]:=
ListLogLinearPlot[AmplitudFrecuencia,
  representación log lineal de lista
  Joined → True, PlotRange → {{0, 353}, {0, 12}}, Frame → True,
  unido verdadero rango de representación marco verdadero
  FrameLabel → {"Frecuencias[Hz]", "Aceleraciones [m/Hz^2]}, GridLines → Automatic]
  etiqueta de marco parrilla de líneas automático

```



**Figura E.8** – Pista pequeña de C.U. – Pavimento Seco – Gráfica de Frecuencias [Hz] vs. Aceleraciones [m/Hz<sup>2</sup>]

## *E. IV. Obtención de Frecuencias – Pista grande en*

### *C.U. – Pavimento Mojado (Lluvia)*

# Anexo E: Obtención de Frecuencias Principales

## Pista grande en C.U. - Pavimento Mojado (Lluvia)

---

### Paso 1 - Importar Datos

```
In[123]:-  
  ListaDatos = Import[  
    |importa  
    "C:\\Users\\raul1\\Documents\\Titulacion\\2024-06-30\\AceleracionesReales\\PistaGrande  
    |constante  
    -Lluvia.csv"];  
  
In[124]:-  
  Dimensions[ListaDatos];  
    |dimensiones
```

---

### Paso 2 - Obtener Aceleraciones en Z (vertical) y Tiempo

```
In[125]:-  
  AcelsZ = ListaDatos[[All, 4]];  
    |todo  
  
In[126]:-  
  Tiempos = ListaDatos[[All, 1]];  
    |todo  
  
In[127]:-  
  FrecuenciaMuestreo = 500 (*Hz*);
```

---

### Paso 3 - Realizar la Transformada de Fourier Rápida (FFT)

```
In[128]:-  
  LimpiezaAcelsZ = Select[AcelsZ, NumericQ];  
    |selecciona |Z_expresión num  
  
In[129]:-  
  FFTAcelsZ = Fourier[LimpiezaAcelsZ];  
    |transformada de Fourier discreta
```

**Figura E.9** – Pista grande de C.U. – Pavimento Mojado (Lluvia) – Pasos 1 al 3

---

## Paso 4 - Obtener Frecuencias

```
In[130]:-  
  NumAcelsZ = Length[AcelsZ];  
           |longitud  
In[131]:-  
  Frecuencias = Table[i * FrecuenciaMuestreo / NumAcelsZ, {i, 0, NumAcelsZ - 1}];  
                |tabla
```

---

## Paso 5 - Graficar Frecuencias vs Magnitud del Espectro

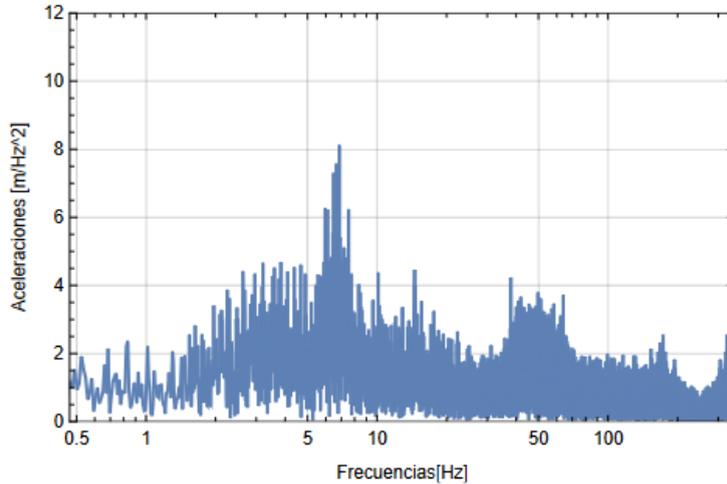
```
In[132]:-  
  Magnitud = Abs[FFTAcelsZ];  
            |valor absoluto  
In[133]:-  
  Length[Tiempos];  
          |longitud  
In[134]:-  
  TiempoMuestra = Tiempos[[Length[Tiempos]]];  
                  |longitud  
In[135]:-  
  Δt = TiempoMuestra / (Length[Tiempos]);  
      |longitud  
In[136]:-  
  Δf = 1 / (Length[Tiempos] * Δt);  
        |longitud  
In[137]:-  
  AmplitudFrecuencia =  
    Table[{i * FrecuenciaMuestreo / NumAcelsZ, Magnitud[[i]]}, {i, 1, Length[Magnitud]}];  
          |tabla |longitud  
In[138]:-  
  (Length[Magnitud] * Δf) / (Sqrt[2]);  
  |longitud |raíz cuadrada
```

Figura E.10 – Pista grande de C.U. – Pavimento Mojado (Lluvia) – Pasos 4 y 5

In[139]:=

```
ListLogLinearPlot[AmplitudFrecuencia,  
  [representación log lineal de lista  
  Joined → True, PlotRange → {{0, 353}, {0, 12}}, Frame → True,  
  [unido [verd... [rango de representación [marco [verdadero  
  FrameLabel → {"Frecuencias[Hz]", "Aceleraciones [m/Hz^2]"}, GridLines → Automatic]  
  [etiqueta de marco [parrilla de lín... [automático
```

Out[139]=



**Figura E.11** – Pista grande de C.U. – Pavimento Mojado (Lluvia) – Gráfica de Frecuencias [Hz] vs. Aceleraciones [m/Hz<sup>2</sup>]

## ***E. V. Obtención de Frecuencias – Pista grande en C.U. – Pavimento Seco***

# Anexo E: Obtención de Frecuencias Principales

## Pista grande en C.U. - Pavimento Seco

---

### Paso 1 - Importar Datos

```
In[140]:-  
ListaDatos = Import[  
  |importa  
  "C:\\Users\\raul1\\Documents\\Titulacion\\2024-06-30\\AceleracionesReales\\PistaGrande  
  |constante  
  -Seco.csv"];  
  
In[141]:-  
Dimensions[ListaDatos];  
|dimensiones
```

---

### Paso 2 - Obtener Aceleraciones en Z (vertical) y Tiempo

```
In[142]:-  
AcelsZ = ListaDatos[[All, 4];  
  |todo  
  
In[143]:-  
Tiempos = ListaDatos[[All, 1];  
  |todo  
  
In[144]:-  
FrecuenciaMuestreo = 500 (*Hz*);
```

---

### Paso 3 - Realizar la Transformada de Fourier Rápida (FFT)

```
In[145]:-  
LimpiezaAcelsZ = Select[AcelsZ, NumericQ];  
  |selecciona      |expresión num  
  
In[146]:-  
FFTAcelsZ = Fourier[LimpiezaAcelsZ];  
  |transformada de Fourier discreta
```

**Figura E.12** – Pista grande de C.U. – Pavimento Seco – Pasos 1 al 3

## Paso 4 - Obtener Frecuencias

```
In[147]:-  
    NumAcelsZ = Length[AcelsZ];  
                |longitud  
  
In[148]:-  
    Frecuencias = Table[i * FrecuenciaMuestreo / NumAcelsZ, {i, 0, NumAcelsZ - 1}];  
                |tabla
```

---

## Paso 5 - Graficar Frecuencias vs Magnitud del Espectro

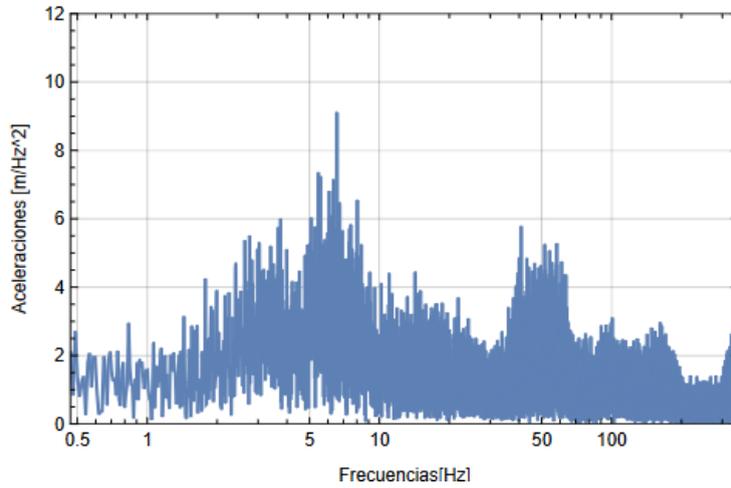
```
In[149]:-  
    Magnitud = Abs[FFTAcelsZ];  
                |valor absoluto  
  
In[150]:-  
    Length[Tiempos];  
                |longitud  
  
In[151]:-  
    TiempoMuestra = Tiempos[[Length[Tiempos]]];  
                |longitud  
  
In[152]:-  
    Δt = TiempoMuestra / (Length[Tiempos]);  
                |longitud  
  
In[153]:-  
    Δf = 1 / (Length[Tiempos] * Δt);  
                |longitud  
  
In[154]:-  
    AmplitudFrecuencia =  
    Table[{i * FrecuenciaMuestreo / NumAcelsZ, Magnitud[[i]]}, {i, 1, Length[Magnitud]}];  
                |tabla |longitud  
  
In[155]:-  
    (FrecuenciaMuestreo) / (Sqrt[2]);  
                |raíz cuadrada
```

Figura E.13 – Pista grande de C.U. – Pavimento Mojado (Lluvia) – Pasos 4 y 5

In[156]:=

```
ListLogLinearPlot[AmplitudFrecuencia,  
  _representación log lineal de lista  
  Joined → True, PlotRange → {{0, 353}, {0, 12}}, Frame → True,  
  _unido      _verd... _rango de representación      _marco      _verdadero  
  FrameLabel → {"Frecuencias [Hz]", "Aceleraciones [m/Hz^2]"}, GridLines → Automatic]  
  _etiqueta de marco      _parrilla de lín... _automático
```

Out[156]=



**Figura E.14** – Pista grande de C.U. – Pavimento Seco – Gráfica de Frecuencias [Hz] vs. Aceleraciones [m/Hz<sup>2</sup>]