



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño de rollbar para un
vehículo impulsado por energía
humana**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Mecatrónica

P R E S E N T A

Sinai Machorro Quiroz

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Vicente Borja Ramírez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Agradecimientos

Uno de los valores más importantes es la gratitud, por ello agradezco a Dios por dejarme culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres, María Elena Quiroz Tamayo y Benjamín Machorro Galindo por enseñarme el valor del trabajo honesto, por su ejemplo de constancia y valores éticos, por su apoyo emocional y económico a lo largo de toda mi vida.

Agradezco a la vida por permitirme conocer a grandes amigos durante mi trayectoria escolar en la universidad: Karina, Alan, Ricardo, Israel, Royer, Pedrito, Ayrton, Luis, Charlie, Issac, Derihan, Armando, Kike y Sergio que me apoyaron emocionalmente y fueron compañeros de desveladas y aventuras durante la carrera.

En especial agradezco a Rodrigo y Mony que han estado en momentos muy difíciles para mí y que hasta la fecha me ofrecen su amistad sincera.

Agradezco a mis compañeros de equipo Velomóvil RS temporada 2019 en especial a Allan Robert y Misael Bravo por ayudarme a desarrollar habilidades blandas y mejorar mi pensamiento crítico a casos de ingeniería. Y a Carmen Morales por brindarme la oportunidad de mejorar mi salud mental.

De la temporada 2020 agradezco a los integrantes: Gloria, Raúl, Juan, Kifara, Johan, Steve, Lalo y Richie por ayudarme a mejorar mis habilidades de liderazgo y brindarme su amistad y confianza.

Y de la temporada 2021 agradezco a todos los integrantes que a pesar de las condiciones de pandemia siempre fueron extremadamente responsables y mostraron la mejor actitud para el trabajo a distancia y dieron su mejor esfuerzo para la competencia en línea.

Agradezco a mi familia por acompañarme en las madrugadas de desvelo, a mis hermanos Israel y Karen que han estado en todo momento, en especial a Karen por ser mi confidente y por traer a Koda nos unió más como familia.

A mis amistades de años (Michell, Charmo y Eddy) y a las nuevas que me han ayudado con su sabiduría a crecer como persona (Jocelyn López).

A mis profesores porque cada uno dejó una enseñanza en mí, independientemente de la materia. Así como a mi director de tesis por tenerme paciencia y darme los mejores consejos y ánimos para terminar este trabajo escrito.

Resumen

En la Facultad de Ingeniería de la UNAM existen diversas agrupaciones estudiantiles, las cuales brindan a los estudiantes la oportunidad de enfrentarse a retos ingenieriles reales, desde el diseño hasta la manufactura así como el desarrollo de las habilidades de redacción de reportes profesionales y exposición de éstos, según los lineamientos de cada competencia a la que se asista. Algunas de las competencias a las que se asisten son Baja SAE, Fórmula SAE, SAE Aero Design , Puentes de Acero ASCE, HPVC entre otras.

La agrupación o equipo Velomóvil RS participa en la competencia HPVC *Human Powered Vehicle Challenge* por sus siglas en inglés. En esta competencia se evalúa el diseño, reporte técnico, exposición y rendimiento de vehículos impulsados por energía humana de dos o más ruedas, según lineamientos de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME).

El equipo Velomóvil RS divide el diseño del vehículo impulsado por energía humana en diferentes sistemas: chasis, asiento y mandos, administración y finanzas, transmisión y frenos, Dirección y suspensión, innovación, aerodinámica y seguridad.

Siendo seguridad el sistema protagonista de la siguiente tesis, la cual recolectará información sobre el proceso de diseño de tres temporadas y sus cambios a lo largo de cada una, contemplando los aprendizajes e innovaciones en el diseño de la temporada anterior.

El sistema de seguridad consiste en el diseño de una estructura llamada *rollbar* que protege al piloto en caso de volcaduras ya que se espera que la estructura toque antes el suelo, manteniendo cabeza, torso y brazos lejos del contacto de este. Dicha estructura es de suma importancia por lo cual se diseña basándose en el reglamento de la competencia el cual solicita análisis de elemento finito que demuestren que las deformaciones en el material no sobrepasan el esfuerzo de fluencia así como, realizar pruebas mecánicas a una réplica de la estructura para comprobar que al someterse a las fuerzas establecidas el material no sobrepasa el límite de fluencia. Todo esto como parte del proceso de diseño.

Este trabajo tiene la finalidad de hacer un compendio para que futuras generaciones tengan toda la información de aprendizajes y conocimientos del diseño del sistema. Así como, documentar el proceso de diseño y manufactura para la competencia HPVC 2021, pero debido a la pandemia por Covid 19 y las condiciones de la competencia, la manufactura no se llevó a cabo.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1	2
Antecedentes	2
Qué es el HPVC	2
Participación de la UNAM en la competencia	3
Traducción de necesidades	5
Capítulo 2	7
Definición del problema	7
Objetivo	7
Alcances	7
Metodología	7
Equipo	8
Capítulo 3	11
Desarrollo de diseño de <i>rollbar</i> temporada 2019	11
Generación de conceptos	11
Diseño de configuración	14
Diseño de detalle	15
Hallazgos y aprendizajes	18
Capítulo 4	19
Supervisión de diseño de <i>rollbar</i> temporada 2020	19
Generación de conceptos	19
Diseño de configuración	20
Diseño de detalle	20
Manufactura de <i>Rollbar</i>	24
Hallazgos y aprendizajes	25
Capítulo 5	26
Supervisión de diseño de <i>rollbar</i> temporada 2021	26
Generación de concepto	26
Diseño de configuración	27
Diseño de detalle	27
Hallazgos y aprendizajes	31
Conclusiones	32
Referencias	35
Anexos	36

Introducción

Las competencias de HPVC *Human Powered Vehicle Challenge* tienen como objetivo diseñar y manufacturar un vehículo impulsado por energía humana, el cual debe cumplir con un reglamento para su diseño y enfrentarse a un circuito con diversos obstáculos con la finalidad de poner a prueba la resistencia de los vehículos así como la eficiencia de los sistemas dinámicos como son la transmisión, suspensión, dirección, frenos y aerodinámica.

La Asociación de ingenieros mecánicos (ASME) es la encargada de organizar las competencias HPVC. Esta asociación tiene sus propias normas para el diseño, que son base del reglamento de la competencia.

En dicho reglamento se hace énfasis en la seguridad de los pilotos en la competencia por lo que es un tema de prioridad para los jueces los cuales aprueban si el vehículo es seguro para competir o de lo contrario existe la descalificación de éste.

Al ser un tema tan importante la seguridad, se designó un sistema completo en el equipo Velomóvil RS de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Este sistema consta de una estructura que protege al piloto en caso de alguna caída o volcadura, denominada *rollbar* y también contempla la elección del casco y cinturones de seguridad que utilizará el vehículo.

En este trabajo se explicará el proceso de diseño del *rollbar* empleado durante tres temporadas en el equipo Velomóvil RS, donde el proceso fue evolucionando de acuerdo a los aprendizajes anteriores y puliendo metodologías de diseño propuestas, haciendo un proceso de diseño del sistema más completo.

En el capítulo uno se menciona la descripción de la competencia HPVC y las especificaciones de diseño del vehículo impulsado por energía humana solicitadas por el reglamento de la competencia. Además se menciona la participación de la UNAM en estas competencias desde el año 2015.

El segundo capítulo describe los objetivos y alcances de esta tesis, la metodología de diseño que ha seguido el equipo Velomóvil RS así como, una pequeña presentación de los integrantes del equipo y la forma de trabajo.

Los capítulos 3, 4 y 5 están dedicados a la descripción breve y concreta del proceso de diseño utilizado en cada temporada, desde la 2019 hasta la 2021.

Capítulo 1

Antecedentes

Qué es el HPVC

Human Powered Vehicle Challenge es una competencia organizada por *ASME* (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos) en la cual se da la oportunidad de diseñar y manufacturar un vehículo impulsado por potencia humana, a estudiantes de ingeniería[1].

Un HPV (*Human Powered Vehicle*) es un vehículo que es impulsado únicamente por fuerza muscular de los pilotos, ésta puede ser ejercida más comúnmente por piernas o brazos pero no se limita a un grupo muscular en acción, Imagen 1.1.



Imagen 1.1 Vehículo Impulsado por energía humana. Recuperado de <https://asmeitesco.files.wordpress.com/2011/11/hpvc.png>

El diseño de éstos va desde 2 llantas hasta las que sean necesarias para cumplir con la movilidad del vehículo[2].

La competencia se divide en 4 eventos: diseño, innovación, velocidad y resistencia de los cuales se premian los primeros 3 lugares de cada evento por separado y los 3 primeros lugares de la compilación de los 4 eventos. En la competencia se ponen a prueba los conocimientos ingenieriles para diseñar y reportar de una forma profesional el proceso de diseño, así como el rendimiento del vehículo ante diferentes carreras.

Esta competencia tiene lugar en diferentes sedes (Asia Pacífico, Latinoamérica, Estados Unidos Norte y Sur) y se desarrollan 4 competencias durante el año, en las cuales participan diferentes universidades de todo el mundo, por ejemplo: Thakur College of Engineering and Technology, Mumbai, Universidad Estatal de Dakota del Sur, Universidad de Akron, Universidad de Ohio, Universidad de Toronto, Universidad de los Andes, Universidad Pontificia Bolivariana, Universidad Nacional Autónoma de México.

La primera competencia de HPVC fue en 1983 en la Universidad de California, Davis y fue ganada por la Universidad Estatal de California, Chico.

Participación de la UNAM en la competencia

En 2015 el equipo, HPV Puma Bike, participó en el HPVC Latinoamérica con sede en Colombia donde obtuvo el 5° lugar en diseño y 8° general. En la imagen 1.2 se observa el vehículo en competencia.



Imagen 1.2 “Halcón” en HPVC Latinoamérica 2015. Recuperado de la base de datos del equipo Velomóvil RS.

En 2016 fue la primera participación en HPVC E.E.U.U del equipo HPV Puma Bike, donde obtuvo el lugar 22° en diseño y 24° general. Compitiendo con el vehículo “Virgilio”.

En 2017 la participación del equipo HPV Puma Bike (Imagen 1.3), fue en el *HPVC West*, donde obtuvo el 2° lugar en diseño y 7° en general.



Imagen 1.3 “Koj” en HPVC West 2017. Recuperado de base de datos del equipo Velomóvil RS.

En 2018 el equipo HPV Puma Bike cambió de nombre por Velomóvil RS y participó en *HPVC West* (Imagen 1.4), donde obtuvo el 1° en diseño y 7° en general.

En esa temporada se utilizó el modelo de diseño: “Palh & Beitz”[3]. Siendo ésta su última participación en competencia, en donde el 1er lugar no solo fue en la sede sino que a nivel internacional teniendo la mayor puntuación de 89.23 a nivel global.



Imagen 1.4 “Noesis” en HPVC West 2018. Recuperado de base de datos del equipo Velomóvil RS.

Para los años 2019 y 2020 por diversas situaciones externas al equipo no se compitió en ninguna sede del HPVC, pero se desarrolló un vehículo diferente para cada año.

En el 2021 se desarrolló un HPV para la competencia HPVC 2021 internacional, que se desarrolló de manera virtual evaluando solo el proceso de diseño del vehículo.

Traducción de necesidades

Según los lineamientos establecidos por el reglamento de ASME [4], para la fabricación de un HPV se obtuvieron las siguientes especificaciones:

- El vehículo tiene un *rollbar* que soporta la carga lateral y superior con la deformación mínima establecida en las reglas ASME HPVC (1330 [N] y 2670 [N] respectivamente).
- El vehículo alcanza el alto total en un máximo de 6 [m] desde una velocidad de 25 [km / h] utilizando solo el sistema de frenado.
- El vehículo avanza 30 [m] continuamente en una línea recta establecida a la velocidad de caminar.
- El vehículo proporciona a la unidad un campo de visión orientado hacia adelante de al menos 180 [°] de ancho.
- Las dimensiones del vehículo permiten realizar una correcta técnica de pedaleo para el piloto más alto.
- Las partes dinámicas del vehículo (soportes de polea para guía de cadena y muñón) soportan los casos críticos de carga establecidos sin exceder el esfuerzo de fluencia.
- Los pedales y el punto más bajo del chasis con respecto al suelo es superior a 5 [cm].
- El vehículo tiene un radio de giro máximo de 8 [m] en ambas direcciones.
- La carcasa reduce la potencia necesaria para mover el vehículo en comparación con no usarla.
- Los mandos del vehículo permiten un manejo que evita el riesgo de lesiones para todos los pilotos del equipo.
- El costo del vehículo generado al equipo es menor a 2000 [USD].
- La fabricación del vehículo tarda menos de 6 semanas.
- El vehículo tiene un peso máximo de 25 [kg].
- Las poleas del sistema de transmisión tienen una eficiencia de ensamble de 40%.
- El vehículo tiene un reposacabezas para evitar lesiones en el cuello.

Las reglas de ASME hacen especial énfasis en cuidar la seguridad de los pilotos y de la audiencia por lo que el desarrollo de un sistema de seguridad antivuelco es necesario (RPS por sus siglas en inglés *Rollover Protection System*). Este sistema se compone del cinturón de seguridad, el casco y un *rollbar*. Este último es una estructura que rodea principalmente la cabeza y hombros del piloto, para protegerlo de cualquier volcadura y así su cuerpo no tenga contacto directo con el suelo en ningún momento.

Las necesidades específicas para cumplir con un sistema de seguridad antivuelco son :

- El *rollbar* (Imagen 1.5) soporta una carga de 2670 [N] sin sobrepasar el esfuerzo de cedencia, aplicada 12 [°] respecto a la vertical y su máxima deformación elástica es menor a 5.1 [cm].
- El *rollbar* soporta una carga de 1330 [N] sin sobrepasar el esfuerzo de cedencia, aplicada en el lateral de su estructura y su máxima deformación elástica es menor a 3.8 [cm].

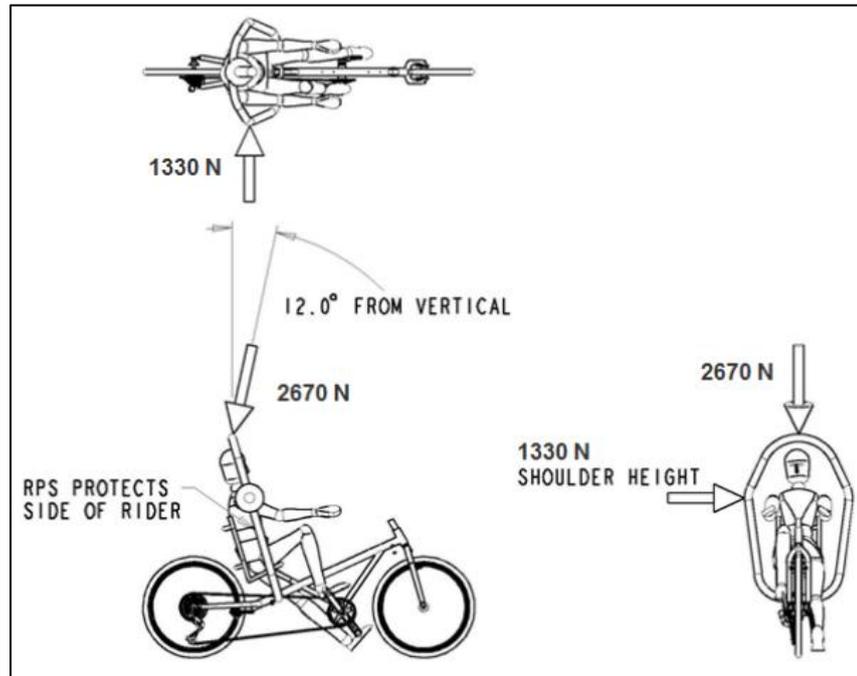


Imagen 1.5 Ejemplo de aplicación de carga lateral y superior en el *rollbar* . Recuperado del reglamento HPVC 2019.

De acuerdo al reglamento, estas necesidades se comprueban con un análisis estructural computacional, en pruebas al *rollbar* manufacturado, aplicando los casos de carga solicitados, por último, demostrando el sistema en funcionamiento con el piloto sobre el vehículo simulando una caída lateral y una volcadura de 180 [°] en la cual ninguna parte del cuerpo del piloto debe tocar el suelo [4].

Capítulo 2

Definición del problema

Objetivo

Proponer un modelo de *rollbar* que cumpla con las especificaciones del reglamento de ASME 2021 pasando por todo el proceso de diseño hasta la manufactura.

Obtener una conclusión de los cambios y sugerencias para el diseño de los siguientes modelos de *rollbar* para competencias de HPVC.

Alcances

Hacer un compendio de la evolución e innovación de los diseños de tres temporadas en el sistema de seguridad de un velomóvil .

Diseñar un *rollbar* para la competencia HPVC 2021.

Elaborar el modelo sólido del *rollbar*.

Verificar el *rollbar* con análisis estructural por elemento finito, de acuerdo al proceso de simulación del equipo Velomóvil RS.

Metodología

A lo largo de las temporadas, el equipo Velomóvil RS, fue puliendo la metodología utilizada para el desarrollo de cada uno de los sistemas, basados en diferentes metodologías de diseño y adaptándose a las necesidades y posibilidades del equipo.

En el sistema de seguridad los siguientes puntos enuncian los pasos seguidos para cumplir con el diseño del *RPS* (Sistema de protección antivolvaduras):

- Traducir necesidades del cliente (reglamento de ASME para competencia HPVC)
- Hacer un estado del arte de lo que se ha hecho en el sistema a desarrollar, tanto en el equipo como en otros equipos de la competencia.
- Caracterizar al piloto más alto para diseñar con medidas de los pilotos de la temporada.
- Investigar métodos de manufactura y corroborar lo posible en el mercado.
- Diseño conceptual de *rollbar*.
- Validar geometría conforme a pruebas de volcaduras, montando prototipo 1:1 sobre vehículo anterior o banco de pruebas, con el piloto y replicar dichas pruebas.
- Realizar análisis estructural por elemento finito a propuesta de CAD con geometría validada.
- Diseño iterativo de la propuesta en caso de necesitar aumento de calibre o cambio de geometría.
- Hacer escantillones para *rollbar*.
- Manufacturar diseño final de estructura (*rollbar*).

- Prueba en máquina universal de tensión y compresión con cargas determinadas por el reglamento.
- Soldar en el chasis de la temporada.
- Hacer pruebas de simulación de volcaduras con el piloto más alto sobre el vehículo.

Equipo

La estructura del equipo Velomóvil RS en cada temporada está representada en la Imagen 2.1. Durante las temporadas 2019, 2020 y 2021 fue asesorado por el M.I. Antonio Zepeda, pero los integrantes del equipo cambiaron en cada una de ellas.

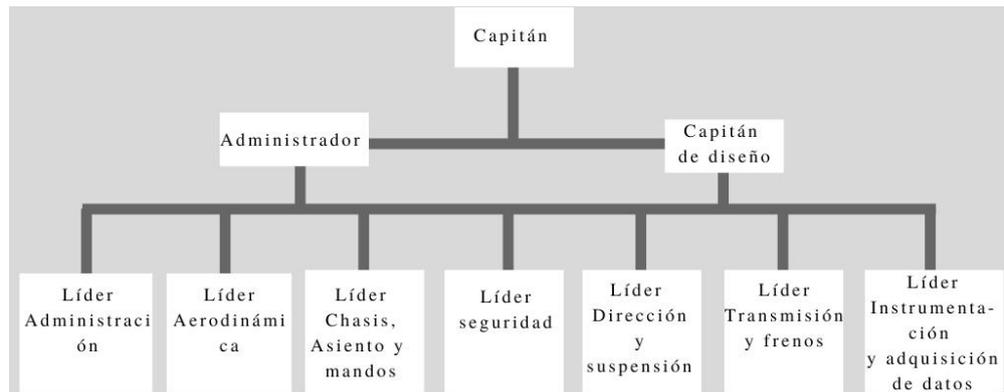


Imagen 2.1 Organigrama del equipo Velomóvil RS. Recuperado de base de datos del equipo Velomóvil RS.

Integrantes del equipo 2019 (Imagen 2.2):

Damián Lopez, Capitán del equipo
 Allan Pereyra, Capitán de diseño
 Andrés López, Líder de sistema
 Misael Bravo, Líder de sistema
 Carmen Morales, Líder de sistema
 Rebeca Cuevas, Chasis, asiento y mandos.
 Vianney Castro, Administración
 Paulina Torres, Administración
 Sinai Machorro, Aerodinámica y Seguridad.



Imagen 2.2 Velomóvil RS temporada 2019. Recuperado de base de datos del equipo Velomóvil RS.

Integrantes del equipo 2020 (Imagen 2.3):
Sinai Machorro, Capitán del equipo y líder de sistema
Vianney Castro, Líder de sistema
Johan Romo, Aerodinámica
Juan Erazo, Dirección y suspensión
Ricardo Martínez, Dirección y suspensión
Ángel Quiroz, Transmisión y frenos
José Gómez, Seguridad
Gloria Vázquez, Chasis, asiento y mandos.
Eduardo Cortés, Chasis, asiento y mandos
Kevis Moo, Administración
Raúl García, Administración.



Imagen 2.3 Velomóvil RS temporada 2020. Recuperado de la base de datos del equipo Velomóvil RS.

Integrantes del equipo 2021 (Imagen 2.4):
Gloria Vázquez, Capitán del equipo
Sinai Machorro, Capitán de diseño y líder de sistema
Raúl García, Líder de sistema
Rodrigo Alvarado, Instrumentación y Adquisición de datos
Favio Perales, Seguridad
Paola Flores, Chasis Asiento y mandos.
Alberto Vázquez, Dirección y suspensión
Diego Merín, Dirección y suspensión
Aldo Daniel, Transmisión y frenos

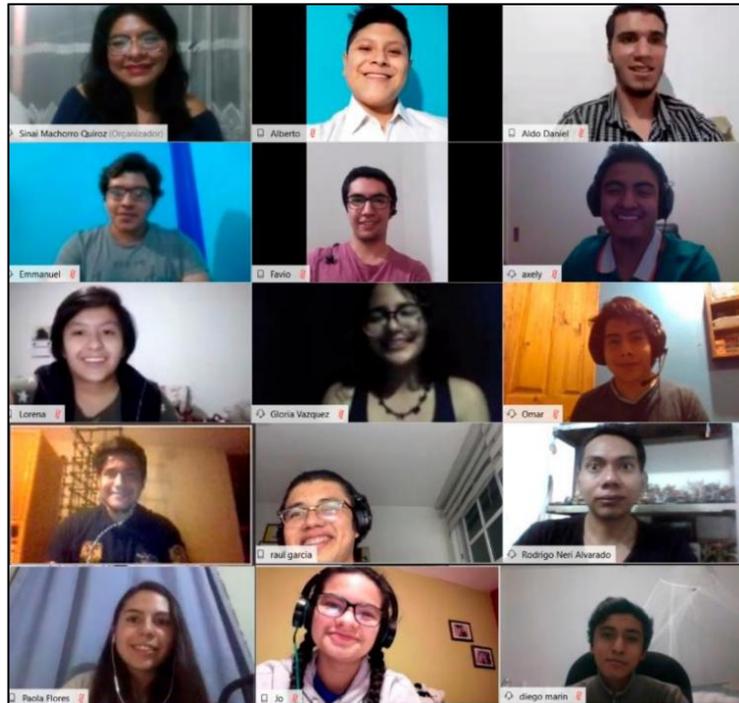


Imagen 2.4 Velomóvil RS temporada 2021. Recuperado de base de datos del equipo Velomóvil RS.

Capítulo 3

Desarrollo de diseño de *rollbar* temporada 2019

En la temporada 2019 el conocimiento fue transmitido por los líderes mencionados en el capítulo anterior de acuerdo a su experiencia en competencias pasadas tanto en el evento de diseño como en el de resistencia y velocidad.

Ya que en la competencia de HPVC West 2018 obtuvieron el primer lugar en el evento de diseño se trató de mantener la metodología y pulir detalles de manufactura para mantener al equipo en el ranking.

Dicha metodología se menciona en este capítulo.

Generación de conceptos

Una vez realizada la recolección de datos para traducir necesidades y especificaciones para diseñar el *rollbar* se continuó con la etapa de generación de conceptos según la metodología de Palh & Beitz[3].

Estado del arte

El estado del arte se realizó observando fotos y reportes de diseño de los HPV de los diferentes equipos y sedes de competencia [1]. Las Imágenes 3.1-3.4 muestran algunas de las diferentes geometrías utilizadas para el diseño del *rollbar*.



Imagen 3.1 E-Fest East 2017. Recuperado de <https://efests.asme.org/gallery/images/e-fest-east-2017>



Imagen 3.2 E-Fest West 2017. Recuperado de <https://efests.asme.org/gallery/images/e-fest-west-2017>



Imagen 3.3 E-Fest Est 2018 Recuperado de <https://efests.asme.org/gallery/images/e-fest-west-2018>



Imagen 3.4 E-Fest West 2018 Recuperado de <https://efests.asme.org/gallery/images/e-fest-west-2018>

En cuanto al desarrollo del *rollbar*, en el equipo Velomóvil RS se mantuvo una geometría base similar que se iteró conforme al rendimiento del *rollbar* de cada vehículo. Por lo que la geometría a seguir fue la del vehículo “Noesis” que consta de dos soportes traseros, dos laterales y un aro (Imagen 3.5).



Imagen 3.5 Rollbar de vehículo “Noesis” temporada 2018.

Caracterización de piloto crítico

El *rollbar* trabaja en conjunto con el casco y cinturones de seguridad para proteger a todos los pilotos de alguna lesión en caso de volcadura, por lo que para su diseño se tomó en cuenta el espesor del casco y las medidas del piloto más alto y el más ancho.

Para cumplir con este requerimiento se acondicionó la herramienta de humano en el software de NX10, modificando las medidas antropométricas predeterminadas por las de los pilotos de la temporada 2019 (Imagen 3.6). Ver anexo A 3.

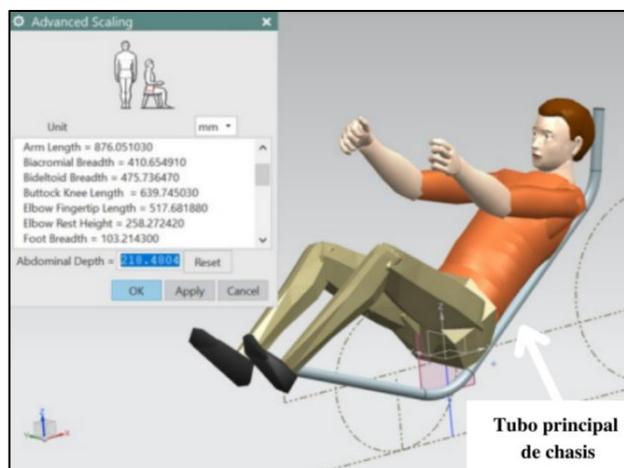


Imagen 3.6 Herramienta “humano” de NX caracterizado con medidas de pilotos 2019.

Según la experiencia del equipo, para el diseño de *rollbar* es necesario contemplar un desplazamiento corporal de los pilotos debido a la sujeción de los cinturones de seguridad, sobretodo en el caso de una caída lateral, el desplazamiento de hombros puede rebasar la estructura y poner en riesgo la seguridad del piloto.



Imagen.3.7 Prueba física de volcadura de 180°. Recuperado de base de datos del equipo Velomóvil RS.



Imagen.3.8 Prueba física de volcadura de 90°. Recuperado de la base de datos del equipo Velomóvil RS.

Teniendo en cuenta la problemática se realizó una prueba en “Noesis”, en la cual se simuló los casos de volcadura con el piloto más ancho, con el fin de observar el desplazamiento del cuerpo del piloto al tener los cinturones de seguridad abrochados (Imagen 3.7) y así conocer la distancia necesaria del aro al casco para mantener al piloto fuera de peligro y no tocar el suelo, así como el desplazamiento del cuerpo en el caso de la volcadura de 90[°] (Imagen 3.8) para obtener la distancia necesaria de la parte más ancha de la espalda con la parte más ancha del aro.

De lo cual, se obtuvo que el *rollbar* necesitaba 20 [cm] entre hombro y la parte más ancha del aro, así como 15 [cm] de la parte más alta de la cabeza a la parte superior del aro, para tener tolerancia con el casco que se fuera a elegir.

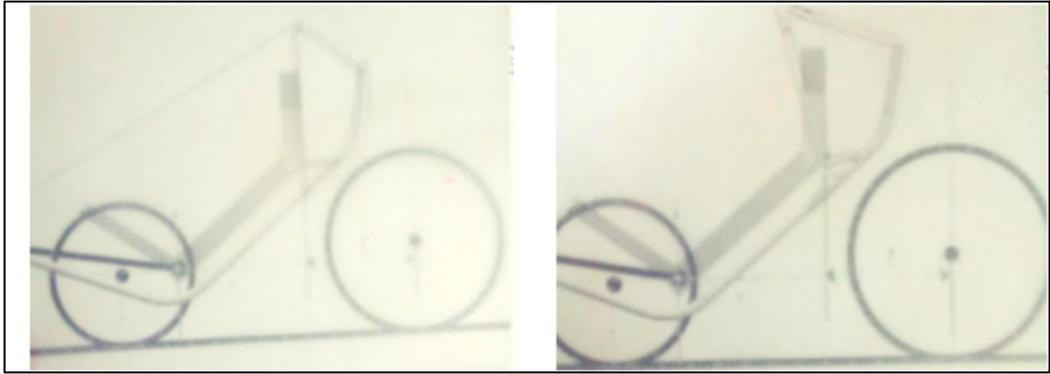


Imagen 3.10 Bocetos de *rollbar*.

Diseño de detalle

En esta etapa del proceso de diseño se definen dimensiones o cantidades, tolerancias o rangos, materiales y procesos de manufactura. Se utilizan herramientas computacionales como lo es el CAD (Diseño asistido por computadora) y el CAE (ingeniería asistida por computadora).

Diseño asistido por computadora (CAD)

Con ayuda de los bocetos, la información de radios de doblado, tubos comerciales y las medidas necesarias para proteger en todo momento el cuerpo del piloto obtenidas en las pruebas de volcadura, se determinó la geometría del *rollbar* y teniendo como referencia la herramienta de humano de NX con las medidas personalizadas de los pilotos, se diseñó un *rollbar* en CAD como lo muestra la Imagen 3.11.

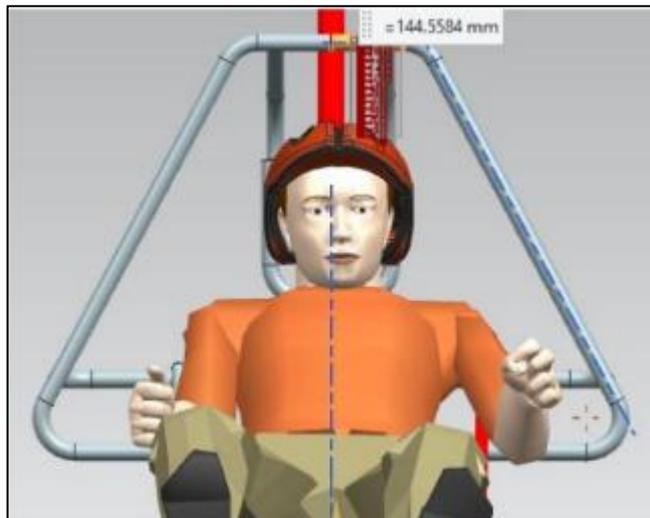


Imagen.3.11 Vista frontal de modelo de *rollbar* temporada 2018 con herramienta de humano en NX.

Validación de geometría

Para validar que el diseño de la geometría del *rollbar* mantenía seguro a los pilotos en las volcaduras, se realizó un modelo funcional con PVC, el cual se moldeó con una pistola de calor y utilizando como base los planos escala 1:1 de la geometría ya diseñada en CAD (Imagen 3.12).



Imagen 3.12 Manufactura de modelo de PVC. Recuperada de la base de datos del equipo Velomóvil RS.

Se ancló el modelo de PVC al tubo principal de “Noesis” y se realizaron las pruebas de volcadura con el piloto más ancho de la espalda para observar las distancias reales entre el cuerpo del piloto y la estructura al ser volteado.

Análisis por elemento finito (FEA)

Para comprobar que el diseño de *rollbar* cumpliría las cargas solicitadas por el reglamento HPVC, se realizó un análisis estructural por elemento finito en el software HyperMesh de Altair (Imagen 3.13).

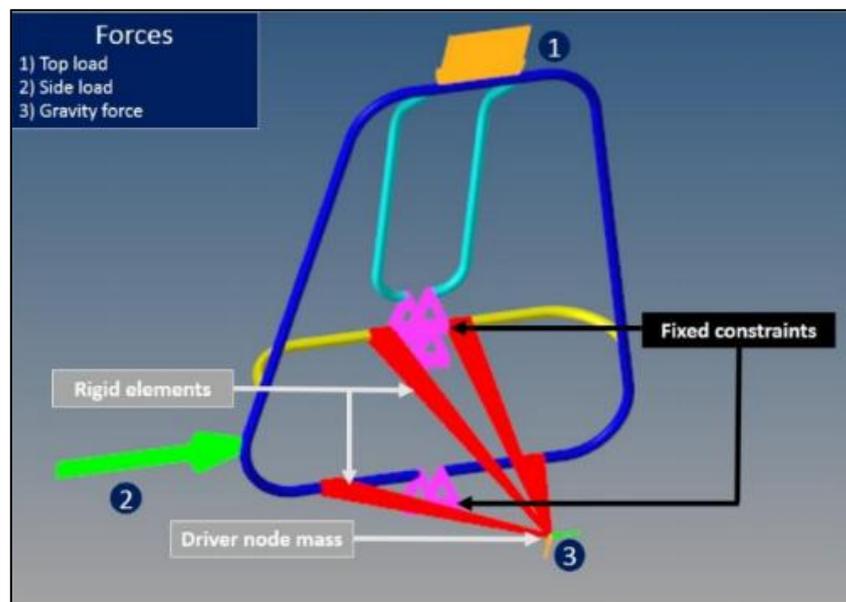


Imagen 3.13 Análisis estructural temporada 2018. Recuperado de la base de datos del equipo Velomóvil RS.

El análisis estructural para el *rollbar* se basó en el realizado en la temporada 2018 como lo muestra la Imagen 3.13. Con la diferencia de que el realizado en la temporada 2019 simuló un campo de gravedad en lugar de una fuerza para el peso del piloto (Imagen 3.14).

El análisis aplicado fue del tipo estático lineal ya que nos interesa el comportamiento elástico del material. Para realizar el análisis por elemento finito se consideró una malla mixta 2D con elementos cuadrados y trias con un tamaño de 1 [mm].

Se utilizó una propiedad tipo *shell* definiendo el espesor con el valor del calibre de tubos comerciales; se estableció un espesor de 1.21 [mm] para los tubos de color azul y verde de la imagen y 1.52 [mm] para los soportes traseros (tubos rojos).

Se restringieron los 6 grados de libertad de movimiento en las uniones con chasis para simular las restricciones de la soldadura. Para simular la fuerza de reacción ejercida por el piloto en un choque, se creó un nodo de masa del tipo CONM2 con una masa de 65 [kg] (masa del piloto más pesado), ubicado en el centro de gravedad del cuerpo humano, unido con elementos rígidos del tipo RBE2 con limitaciones de movimiento de rotación en los tres ejes, estos se ubicaron en los puntos de anclaje del cinturón de seguridad. También se agregó un campo de gravedad con una aceleración de 9.78 [m/s²] (valor en Ciudad Universitaria UNAM, CDMX) y un sentido opuesto a la carga del caso correspondiente para simular los efectos debidos al peso del piloto y del material de la estructura.

La carga superior, de 2670 [N], fue distribuida en 128 nodos al ser el diámetro de 12.8 [cm] del pistón de la máquina de ensayos de tracción, con un ángulo de 12° respecto a la vertical.

Como carga lateral se aplicó una fuerza horizontal, a la altura del hombro, de 1330 [N] distribuida en 30 nodos que pertenecen a la zona de contacto con el suelo en caso de volteo.

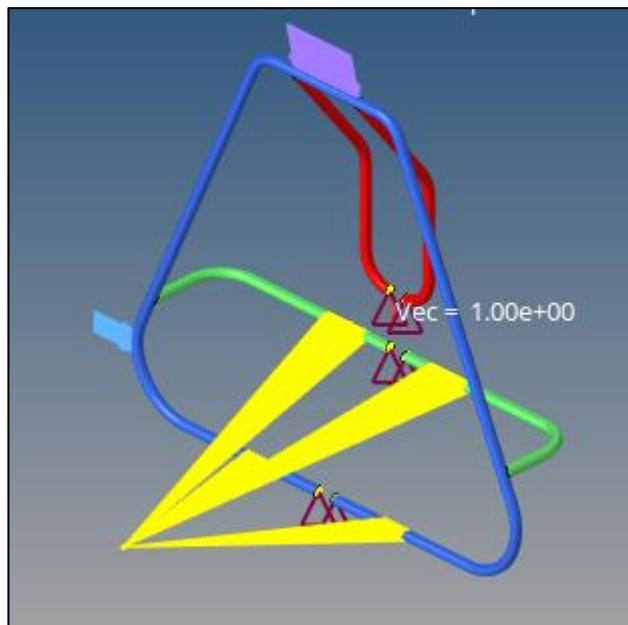


Imagen 3.14 Análisis estructural de *rollbar* temporada 2019.

Los resultados de esfuerzos obligaron a cambiar el espesor de los soportes traseros por 1.9 [mm] para que el esfuerzo de fluencia no fuera excedido.

Con el cambio de espesor se obtuvo que el *rollbar* cumplió con lo establecido en las reglas de ASME al presentar desplazamientos resultantes máximos elásticos de 5.171 [mm] y 2.453 [mm] para carga superior y lateral respectivamente.

Iteraciones al diseño

Se buscó la forma de evitar el desplazamiento del cuerpo del piloto al someterse a la prueba de volcadura de 90 [°], por lo que se hizo el experimento de utilizar dos estructuras en el asiento de vehículo “Noesis” para limitar dicho movimiento y al demostrar su funcionalidad, se rediseñó el *rollbar* con 10 [cm] entre hombro y ancho de la estructura del aro.

Al nuevo modelo se le realizó el FEA con los valores de espesor en la última iteración, pero debido al rediseño, se logró disminuir el espesor de los tubos rojos a 1.52 [mm].

Hallazgos y aprendizajes

La forma de validación de geometría con el uso de PVC fue una nueva implementación de bajo costo, funcional y rápida de realizar. Con ella se pueden hacer pruebas para verificar geometrías y medidas, no solo del *rollbar* sino de otras estructuras como los mandos del vehículo o cualquier otra estructura que necesite un rediseño por geometría o ergonomía de los pilotos.

Las propuestas de implementación de “delimitadores”, los cuales consistían en dos tubos doblados anclados al asiento y *rollbar*, para restringir el desplazamiento del cuerpo en las pruebas de volcadura tanto lateral como superior abrió la posibilidad de reducir el tamaño de la estructura y, por lo tanto, reducir la cantidad de material, su costo y peso, asegurándonos de mantener seguro al piloto.

Capítulo 4

Supervisión de diseño de *rollbar* temporada 2020

En la temporada 2020 hubo cambio de líderes así como entrada de nuevos integrantes, los cuales se encargaron del diseño del nuevo vehículo llamado “Luvina”.

En este capítulo se mencionará el proceso de diseño guiado por el aprendizaje de la temporada 2019.

Generación de conceptos

Estado del arte

La persona encargada de desarrollar el sistema de seguridad, José Luis Arizmendi, investigó los resultados de los análisis estructurales de los *rollbars* de las temporadas anteriores como lo muestra la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Comparación de resultados Esfuerzo-Desplazamiento en vehículos realizados por el equipo Velomóvil RS.

Caso de carga		Temporadas			
	Resultados	2016	2017	2018	2019
Superior	Desplazamiento	5.2 [mm]	8.236 [mm]	2.067 [mm]	5.171 [mm]
	Esfuerzo máximo	323 [MPa]	238 [MPa]	206.7 [MPa]	243.5 [MPa]
Lateral	Desplazamiento	6.8 [mm]	5.95 [mm]	1.585 [mm]	2.453 [mm]
	Esfuerzo máximo	465.75 [MPa]	172.92 [MPa]	209.9 [MPa]	138.1 [MPa]

Caracterización de piloto crítico

Al cambiar constantemente de integrantes de equipo según la temporada, la caracterización de los nuevos pilotos es necesaria y al igual que el proceso mencionado en el capítulo anterior, se utilizaron las medidas necesarias para la herramienta de humano en NX, sobre el nuevo tubo principal de chasis (Imagen 4.1).

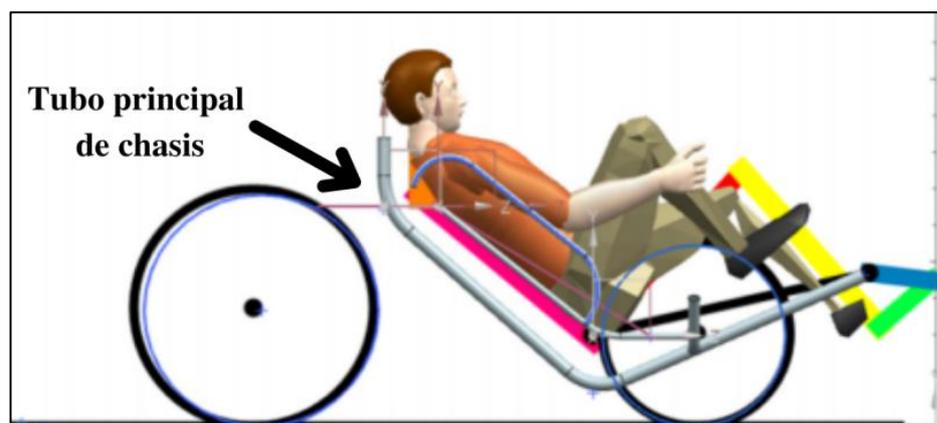


Imagen 4.1 Herramienta “humano” de NX caracterizado con medidas de pilotos 2020.

Radios de doblado y calibres comerciales de tubo

Para el diseño de la temporada 2020 solo se corroboró con las empresas correspondientes los datos obtenidos en la temporada 2019, de manera que se siguieron utilizando las medidas obtenidas de la tabla 3.1.

Diseño de configuración

Con el objetivo de optimizar el diseño propuesto la temporada anterior, la geometría del tubo principal de chasis se conservó al igual que la del *rollbar*, por lo cual se continuó con la geometría mencionada en el capítulo anterior, en la cual el *rollbar* está constituido por un aro, dos soportes laterales y dos trasero.

Diseño de detalle

Diseño asistido por computadora (CAD)

Se diseñó el modelo de *rollbar* tomando en cuenta los aspectos antropométricos de los pilotos y de manufactura mencionados, respetando las medidas de separación entre hombro y aro de 10 [cm] y 15 [cm] entre cabeza y aro.

En este modelo se modificó la forma de anclar para reducir la cantidad de tubo a utilizar en los soportes laterales como lo muestra la imagen 4.2.

Se propuso una ligera inclinación de $4.99 [^\circ]$ respecto a la vertical, para el aro y así disminuir la distancia entre soportes traseros y aro como lo muestra la Imagen 4.3.

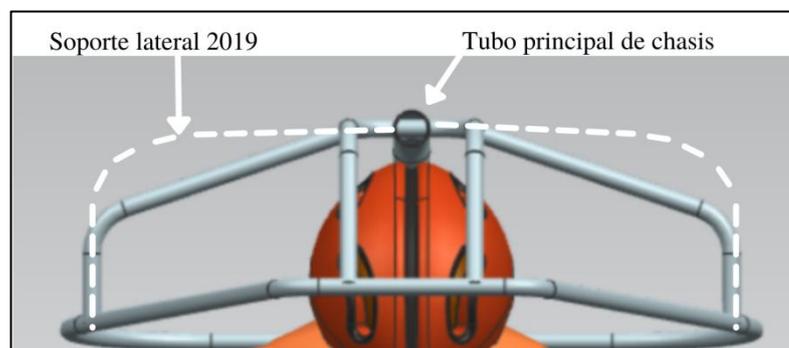


Imagen 4.2 Vista superior de modelo de *rollbar* en NX10 de temporada 2020. Recuperado de la base de datos del equipo Velomóvil RS.

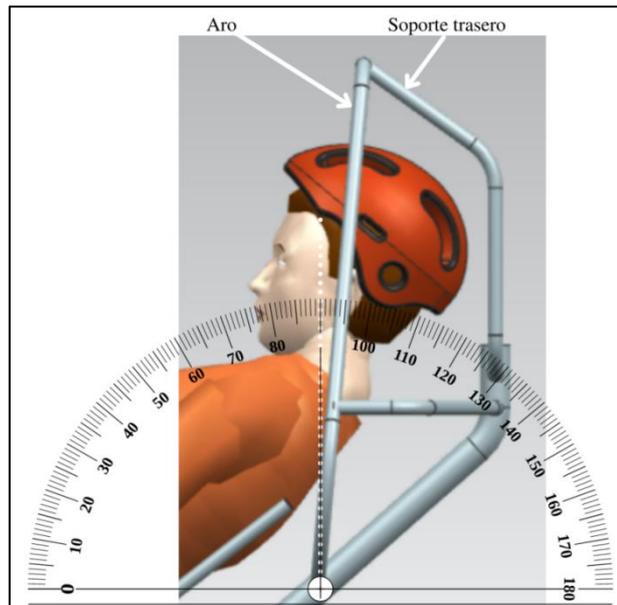


Imagen 4.3 Vista lateral de modelo de *rollbar* en NX10 de temporada 2020. Recuperado de la base de datos del equipo Velomóvil RS.



Imagen 4.4 Modelo de *rollbar* en NX10 de temporada 2020. Recuperado de la base de datos del equipo Velomóvil RS.

Validación de geometría

Al ser nueva la propuesta de delimitadores se realizaron pruebas con diferentes posiciones y para observar cual era más ergonómica y funcional para su cometido de evitar el desplazamiento de hombros y cadera.

Para esto se utilizó el vehículo “Noesis”, en el cual se soldaron dos estructuras dobladas, cada una con una inclinación diferente, una ligeramente hacia dentro del vehículo y la otra hacia afuera, como se muestra en las imágenes 4.5 y 4.6.

De ésta prueba se obtuvo que el delimitador con inclinación hacia dentro era la opción para el diseño, al cumplir mejor con su cometido y no imposibilitar ningún movimiento para los pilotos, mientras se maneja el vehículo.



Imagen 4.5 Prueba de volcadura 90 [°] con delimitador hacia dentro. Recuperado de base de datos del equipo Velomóvil RS.



Imagen 4.6 Prueba de volcadura 90 [°] con delimitador hacia afuera. Recuperado de base de datos del equipo Velomóvil RS.

Una vez validada la geometría se diseñó el modelo de delimitador en Nx 10 con las medidas comerciales y posibles de doblar, como se muestra en la Imagen 4.7.



Imagen 4.7 Modelo de Delimitador en Nx 10. Recuperado de la base de datos del equipo Velomóvil RS.

Obteniendo el modelo en CAD de la Imagen 4.8 que muestra la estructura completa de rollbar y delimitadores anclados.

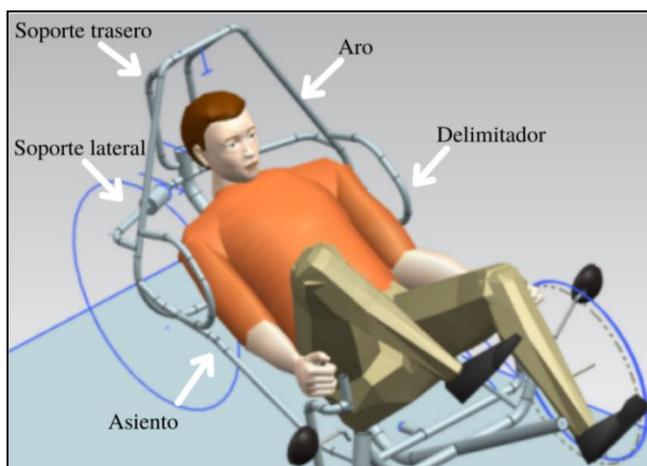


Imagen 4.8 Modelo completo de *rollbar* con delimitadores en Nx 10.
Recuperado de la base de datos del equipo Velomóvil RS.

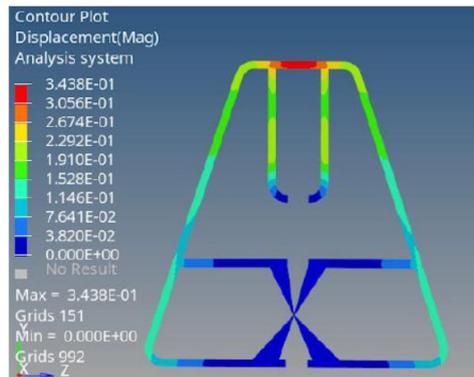
Análisis por elemento finito (FEA)

Para la temporada 2020 se realizó el mismo proceso de análisis estructural mencionado en el capítulo anterior, iniciando con los calibres para tubo utilizados en la temporada 2019 calibre 18 para aro y soportes laterales y calibre 16 para soportes traseros, pero el modelo necesitó de un aumento de calibres para no exceder el esfuerzo de fluencia. Por lo tanto, para el aro se diseñó con tubo de calibre 16.

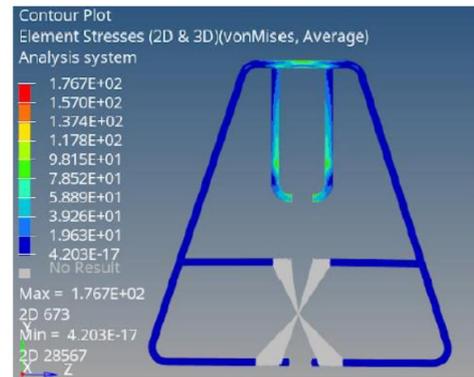
Y se obtuvieron los resultados de esfuerzo y desplazamiento de cada caso en HyperWorks como se muestra en la Imagen 4.9 y se condensaron en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Resultados de Esfuerzo-Desplazamiento para casos de carga.

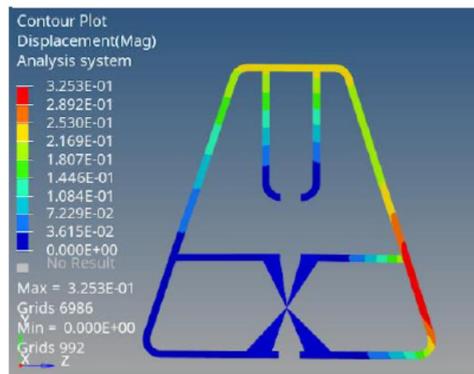
Caso de carga		Temporada 2020
Superior	Desplazamiento	2.51 [mm]
	Esfuerzo máximo	175 [MPa]
Lateral	Desplazamiento	1.047 [mm]
	Esfuerzo máximo	127.8 [MPa]



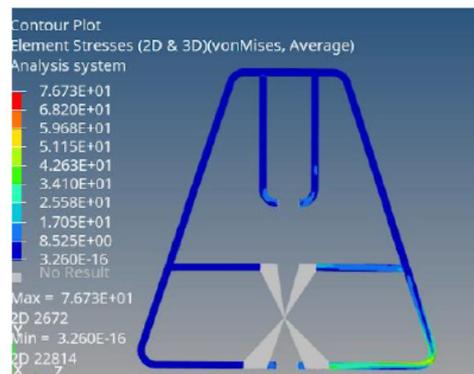
a) Desplazamientos en caso de carga superior de rollbar 2021



b) Esfuerzos en caso de carga superior de rollbar 2021



c) Desplazamientos en caso de carga lateral de rollbar 2021



d) Esfuerzos en caso de carga lateral de rollbar 2021

Imagen 4.9 Visualización de resultados en HyperWorks, de desplazamientos y esfuerzos en casos de carga superior y lateral de *rollbar* 2020.

Para el caso de carga superior, los valores máximos tanto de esfuerzos como de desplazamientos (Imagen 4.9 a y b) están señalados por las zonas rojas. El esfuerzo máximo promedio de Von Mises fue de 175 [MPa], de bajo del esfuerzo de cedencia del Acero A-36 de 250 [MPa], lo que indica que la estructura en este caso de carga se mantiene en la zona elástica. Además, los máximos desplazamientos fueron de 2.51 [mm], menor al establecido por el reglamento de ASME de 51 [mm] para el caso de carga superior.

En el caso de carga lateral (Imagen 4.9 c y d), el esfuerzo máximo promedio de Von Mises fue de 127.8 [MPa], menor al esfuerzo de cedencia del Acero A-36.

Los desplazamientos máximos fueron de 1.047 [mm] que cumplen con lo establecido al reglamento de ASME al ser menores de 38 [mm] para el caso de carga lateral.

Manufactura de *Rollbar*

Para la manufactura del *rollbar* se obtuvieron planos a escala 1:1 para llevarlos a la “Dobladora de tubo metálico”.

Una vez doblados los tubos se realizaron bocas de pescado con el esmeril en los extremos de los tubos y se soldaron con soldadura tipo MIG (Imagen 4.10).

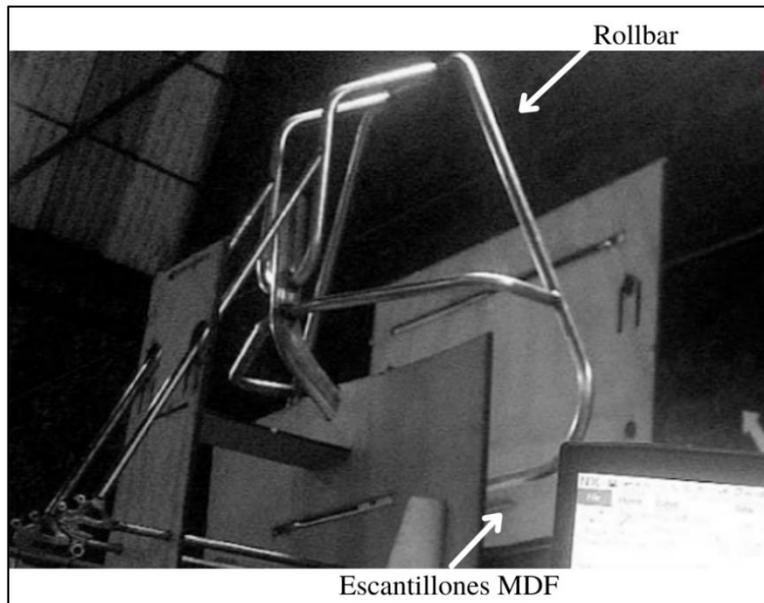


Imagen 4.10 *Rollbar* soldado al vehículo “Luvina” temporada 2020 sobre escantillones. Recuperado de la base de datos del equipo Velomóvil RS.

Hallazgos y aprendizajes

La propuesta de inclinación del aro y soportes laterales funcionó al reducir la cantidad de tubo a utilizar y, por lo tanto, en reducir peso al vehículo además que cuenta con una geometría estructuralmente más resistente a deformaciones.

Capítulo 5

Supervisión de diseño de *rollbar* temporada 2021

La temporada 2020 se llevó a cabo de manera *online* debido a la pandemia por Covid 19 por lo que se tuvo que adaptar un poco la metodología de diseño. En este capítulo se mencionan las adaptaciones.

Generación de concepto

Estado del arte

Se realizó una síntesis del estado del arte por la persona encargada de desarrollar el sistema de seguridad, Favio Fernando Perales. Se investigó los resultados de los análisis estructurales y masas de cada modelo de los *rollbars* de las temporadas anteriores como lo muestra la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Comparación de Esfuerzo, desplazamiento y masa.

Caso de carga		Temporada	
		2019	2020
Superior	Desplazamiento	5.171 [mm]	2.51 [mm]
	Esfuerzo máximo	243.5 [MPa]	175.3 [MPa]
Lateral	Desplazamiento	2.453 [mm]	1.047 [mm]
	Esfuerzo máximo	183.1 [MPa]	127.8 [MPa]
Ancho de hombros		452 [mm]	560 [mm]
Masa de estructura		2.396 [kg]	2.535 [kg]

Otro parámetro que se evaluó en la tabla anterior, fue la mayor longitud de ancho de hombros de los pilotos, ya que de eso depende el ancho del aro y por ende la cantidad de tubo utilizado. Lo cual nos indica que ha habido una optimización de masa en la temporada 2020 porque hay una diferencia de 108 [mm] de ancho de hombro y la masa de la estructura sólo aumentó 0.361 [Kg].

Caracterización de piloto crítico

Como se mencionó en el capítulo anterior, cada temporada cambian los integrantes del equipo, por lo que se caracterizó la herramienta de *Human* de NX10 con las medidas antropométricas de los nuevos pilotos y se posicionó sobre el bosquejo del tubo principal de chasis (Imagen 5.1).

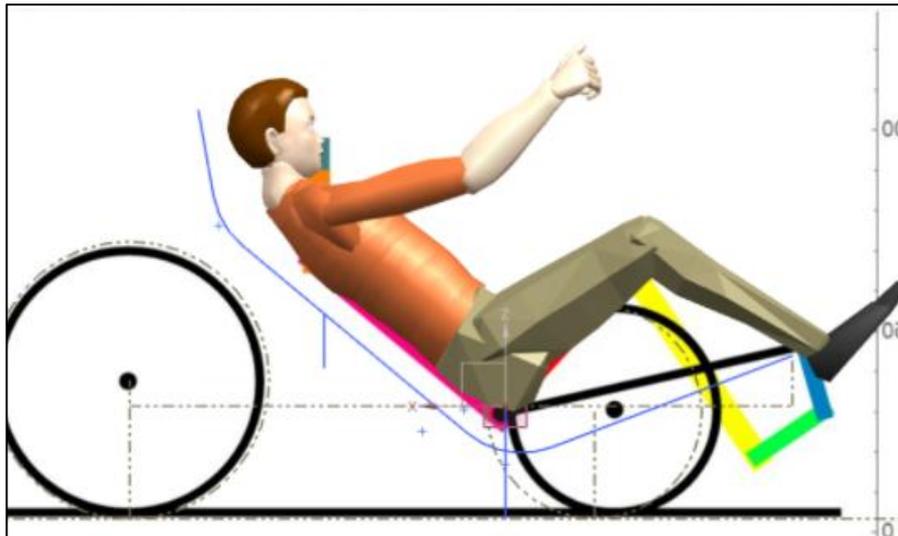


Imagen 5.1. Herramienta de Humano en NX10 caracterizado con medidas antropométricas de pilotos temporada 2021. Recuperado de la base de datos del equipo Velomóvil RS.

Radios de doblado y calibres comerciales de tubo

Al continuar con el mismo proveedor de doblado de tubo, los radios a respetar fueron los mismos mostrados en la tabla 3.1 Radio de dobladora de tubo sucursal Tepalcates.

Diseño de configuración

De acuerdo a los aprendizajes obtenidos de la temporada 2020 se conservó la idea de la inclinación del aro así como, la forma de anclaje de los soportes laterales y traseros.

Diseño de detalle

Diseño asistido por computadora (CAD)

Se utilizó SolidWorks para el modelado en CAD de las propuesta de *rollbar*, en la cual se consideró los requerimientos de la competencia, así como los aprendizajes obtenidos en temporadas pasadas.

Se decidió evaluar de una forma analítica si el uso de los delimitadores era óptimo, por lo que se realizó una tabla comparativa de lo que conlleva la manufactura de la estructura (Tabla 5.2) y un análisis estructural con las mismas restricciones mencionadas en el capítulo 3 a ambas propuestas (Imagen 5.2).

Tabla 5.2 Comparación de estructura de *rollbar* con y sin delimitadores añadidos.

Comparación de <i>rollbar</i> con tubo de 3/4 [in] de calibre 18		
	Con delimitadores	Sin delimitadores
Cantidad de tubo	4.25 [m]	4.75 [m]
Masa de la estructura	1.86 [kg]	4.3 [kg]
Esfuerzos máximos	121.6 [MPa]	117.6 [MPa]
Desplazamientos máximos	0.3 [mm]	1.82[mm]
Alto x ancho	0.7[m] x 0.7 [m]	0.84 [m] x 0.76[m]
Cantidad de dobleces	14	10

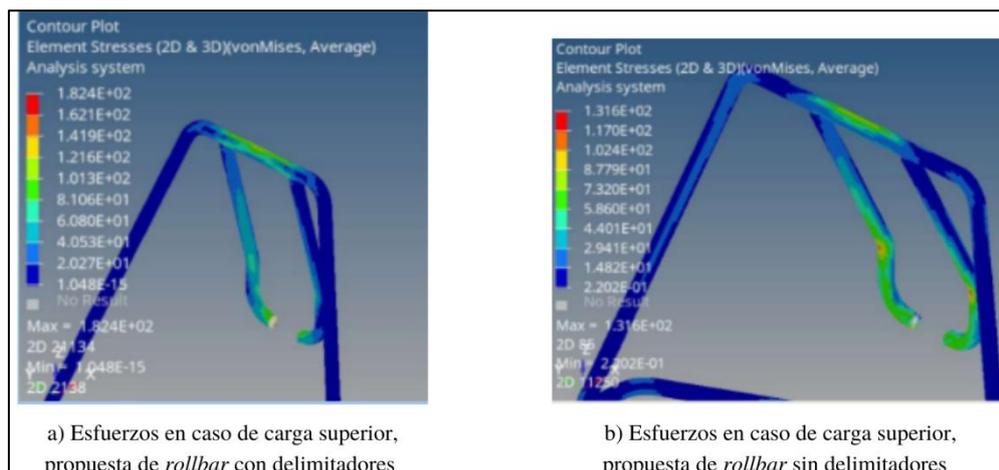


Imagen 5.2 Análisis por elemento finito de *rollbar* con y sin delimitadores con tubos de $\frac{3}{4}$ in, calibre 18. Recuperado de la base de datos del equipo Velomóvil RS.

Los modelos de *rollbar* se analizaron bajo la misma condición de estar hechos de tubo de acero A-36 de $\frac{3}{4}$ [in] con un calibre 18 y sometidos solo a la carga superior de 2670 [N] dando como resultados que el modelo sin delimitadores presentó esfuerzos máximos de 117.6 [MPa] y desplazamientos máximos de 1.82 [mm] mientras que el modelo con delimitadores presentó 121.6 [MPa] y 0.3 [mm] respectivamente. Ambos resultados no sobrepasaron el esfuerzo de cedencia del material (250 [MPa]) ni los desplazamiento máximos permitidos por el reglamento de ASME [4] de 51 [mm].

Los datos recabados se utilizaron en una matriz de decisión (Tabla 5.3) que se puntuó con la técnica de los 6 sombreros [7] y con ayuda de los pesos de importancia para el diseño de la matriz QFD [Anexo A.5].

Tabla 5.3 Matriz de decisión para el diseño de *rollbar* con y sin delimitadores.

Matriz de decisión			
Especificación	Peso	Con delimitadores	Sin delimitadores
Costo	11.6	1	2
Desplazamiento	5.3	2	2
Fuerza	3.2	2	2
Esfuerzos	5.8	2	2
Dimensiones máximas	4.4	2	1
Tiempo de manufactura	9.2	1	1
Masa de estructura	5.3	3	1
Goniometría	7.1	0	2
Antropometría	12.5	1	1
Potencia	2.5	2	-1
Fuerza de arrastre	1.8	2	-1
Calidad de manufactura	11.9	1	1
Total		107.1	105

Como lo indican las puntuaciones de la tabla anterior el uso de delimitadores fue la mejor opción para diseñar.

Una vez tomada esta decisión se diseñó una propuesta de *rollbar* (Imagen 5.3), considerando los aprendizajes obtenidos en las temporadas pasadas como lo fue la distancia del casco a la parte más alta del aro de 15 [cm] y 10 [cm] de cada lado de hombro a la parte más ancha del aro. Así como la forma de anclarse los soportes laterales al tubo principal. En cuanto a la inclinación del aro se realizaron dos diseños, uno con una inclinación de 4.99 [°] como el vehículo anterior y otro con 12°, resultando mejor opción la segunda, según los análisis de elemento finito.



Imagen 5.3 Modelo completo de *rollbar* con delimitadores en SolidWorks. Recuperado de la base de datos del equipo Velomóvil RS.

Análisis por elemento finito (FEA)

Una vez validada la geometría de aro y la ergonomía de los delimitadores para permitir la movilidad y comodidad de los pilotos, se realizó el mismo proceso de análisis estructural mencionado en el Capítulo 3 con la diferencia del tamaño de malla de 2.5 [mm]. Este cambio fue recomendado por un ex miembro del equipo (Misael Bravo) con la finalidad de no perder precisión en resultados pero ahorrando tiempo de cómputo.

El análisis se inició con un calibre 14 (1.9 [mm]) en toda la estructura y se redujo a un calibre 18 (1.21 [mm]) .

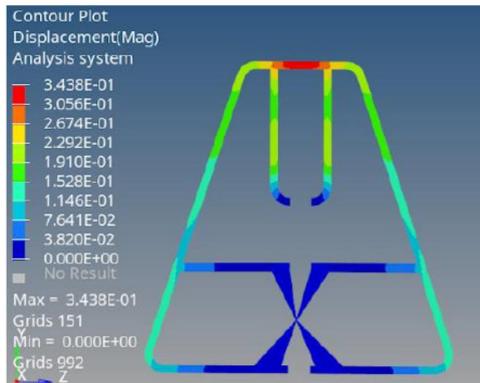
Se obtuvieron los resultados de esfuerzos y desplazamiento de cada caso en HyperWorks como se muestra en la imagen 5.3 y se condensaron en la tabla 5.4.

En el caso de carga superior (Imagen 5.3 a y b) el valor máximo promedio de Von Misses fue 177.9 [MPa], por debajo del esfuerzo de cedencia del Acero

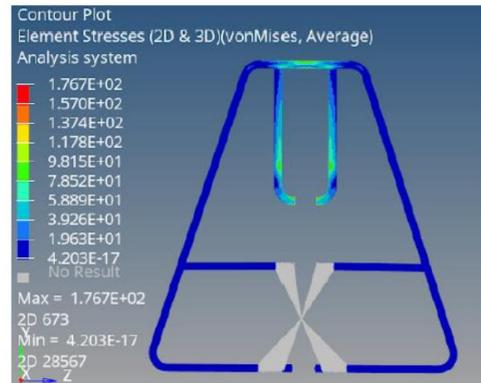
A-36 de 250[MPa], y el desplazamiento máximo fue de 0.36[mm] menor al establecido por el reglamento de ASME [4] de 51 [mm] para este caso de carga.

En el caso de carga lateral (Imagen 5.3 c y d) el esfuerzo máximo promedio de Von Misses fue de 79 [MPa], menor al esfuerzo de cedencia del Acero A-36. Y los desplazamientos máximos fueron de 0.34 [mm] que cumplen con lo establecido al reglamento de ASME al ser menor de 38 [mm] para el caso de carga lateral.

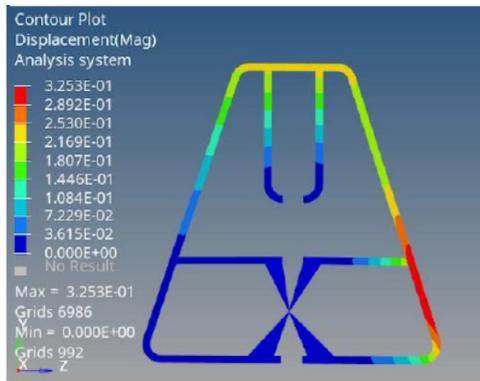
En ambos casos al no exceder el esfuerzo de fluencia, la estructura se mantiene en la zona elástica del material, por lo cual fue un diseño que cumplió con los requerimientos de diseño de la competencia.



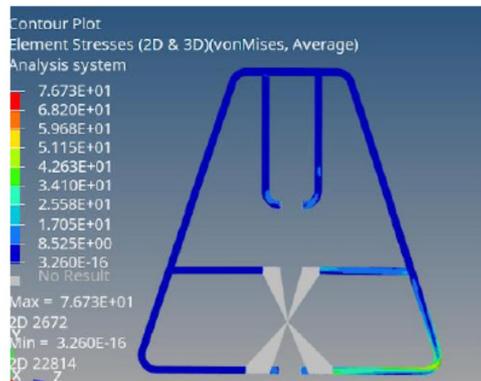
a) Desplazamientos en caso de carga superior de rollbar 2021



b) Esfuerzos en caso de carga superior de rollbar 2021



c) Desplazamientos en caso de carga lateral de rollbar 2021



d) Esfuerzos en caso de carga lateral de rollbar 2021

Imagen 5.4 Visualización de resultados en HyperWorks, de desplazamientos y esfuerzos en casos de carga superior y lateral de *rollbar* 2021. Recuperado de la base de datos del equipo Velomóvil RS.

Tabla 5.4 Resultados de Esfuerzo-Desplazamiento para casos de carga.

Temporada 2021		
Caso de carga		
Superior	Desplazamiento máximo	0.36 [mm]
	Esfuerzo máximo	177.9 [MPa]
Lateral	Desplazamiento máximo	0.34[mm]
	Esfuerzo máximo	79[MPa]

Hallazgos y aprendizajes

Debido a las adaptaciones por el cambio de modalidad para el desarrollo del sistema y para la competencia que sólo evaluó el evento de diseño, se utilizaron herramientas como la matriz de decisión en combinación con análisis de elemento finito para la validación de geometría.

Con la matriz de decisión se pudo hacer una comparación analítica de las mismas especificaciones a cumplir, por lo que corroboramos que los delimitadores si optimizan masa, costo y lo más importante mantiene seguro al piloto.

En la competencia HPVC 2021 compitieron 72 universidades de todo el mundo donde el equipo Velomóvil RS obtuvo el 6° lugar en diseño y siendo el único equipo de latinoamérica en el top 10.

Conclusiones

Debido a la pandemia por Covid 19 la competencia HPVC 2021 se desarrolló de manera virtual por lo que el objetivo de manufacturar el modelo de *rollbar* no se cumplió, pero la competencia se evaluó con el cumplimiento de los lineamientos del reglamento de ASME basados en los análisis de elemento finito de los casos de carga de caída lateral y de la volcadura.

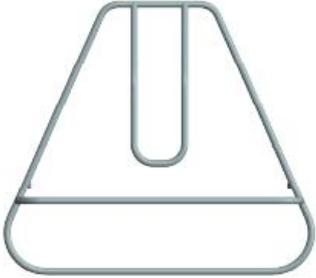
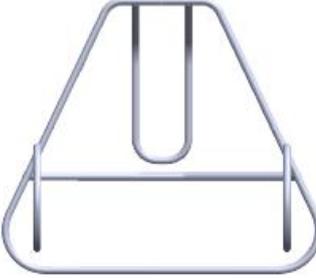
La Tabla 6.1 Muestra la comparación de los resultados obtenidos del análisis estructural aplicado al modelo de *rollbar* de la temporada 2021 y los valores límite permitidos por el reglamento de ASME, lo que comprueba el cumplimiento de las especificaciones.

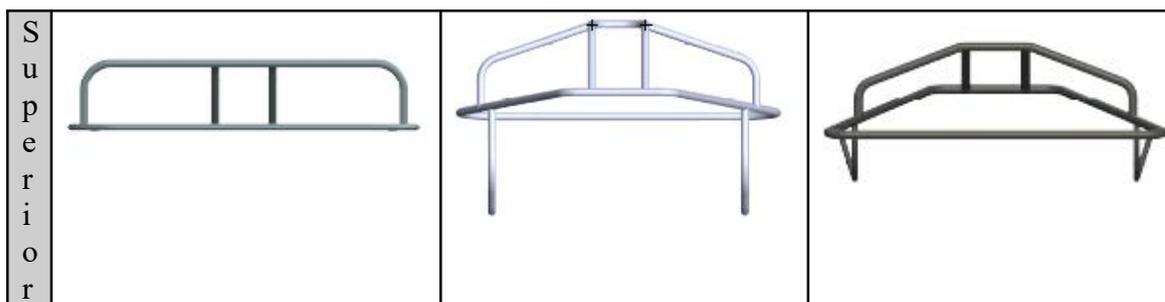
Tabla 6.1 Comparación de especificaciones de reglamento y resultados 2021.

Temporada 2021			Reglamento de ASME	
Caso de carga				
Superior	Desplazamiento máximo	0.36 [mm]	Desplazamiento máximo	51 [mm]
	Esfuerzo máximo	177.9 [MPa]	Esfuerzo máximo	250 [MPa]
Lateral	Desplazamiento máximo	0.34 [mm]	Desplazamiento máximo	38 [mm]
	Esfuerzo máximo	79 [MPa]	Esfuerzo máximo	250 [MPa]

A lo largo de las 3 temporadas se conservó la composición del *rollbar* de un aro, dos soportes laterales y dos soportes traseros, pero su geometría fue cambiando como lo muestra la siguiente Tabla 6.2.

Tabla 6.2 Vistas de los 3 modelos de *rollbar*.

Temporada			
	2019	2020	2021
F r o n t a l			
L a t e r a l			



En la tercera fila se puede observar que el ancho de la parte superior del aro se mantuvo en 128 [mm] de longitud que es el diámetro del pistón de la máquina de ensayos de tracción, mientras que la dimensión inferior del aro depende del ancho del piloto crítico, más una longitud de 20 [cm] de cada lado en el caso de la temporada 2019 y de 10 [cm] en las temporadas 2020 y 2021.

La inclinación del aro también fue un criterio de diseño que fue cambiando, ya que en la temporada 2019 el aro no tuvo inclinación respecto a la vertical mientras que en el *rollbar* 2020 y 2021 la inclinación respecto a la vertical fue de 4.99 [°] y 12 [°] respectivamente.

En cuanto a los soportes laterales, como se muestra en la vista superior de la tabla anterior se observa que en el modelo de la temporada 2019 los soportes laterales forman un ángulo de 90 [°] antes de la curvatura de doblez del tubo mientras que en las temporadas 2020 y 2021 se recorta el recorrido de anclaje al tubo principal de chasis de tal manera que se formó un ángulo diferente a 90 [°] entre los tubos antes del doblez.

Este ángulo depende de la posición en la que se encontraba el tubo principal.

La Tabla 3.6 condensa los datos relevantes de diseño durante las 3 temporadas, lo cual nos da información que a pesar de ser diseños para diferentes pilotos críticos, los desplazamientos en ambos casos de carga disminuyeron.

En cuanto a la masa de la estructura también se ve una disminución significativa entre la temporada 2019 y 2021 al solo diferir 53 [mm] entre la medida de ancho de espalda de pilotos y esto debido al cambio de dimensiones y geometría de la estructura ya que para los 3 modelos se utilizó tubo de $\frac{3}{4}$ [in] de calibre 18.

Tabla 3.6 Resultados de diseño de los modelos de *rollbar* temporadas 2019-202.

		Temporada		
		2019	2020	2021
Carga superior	Desplazamiento	5.171[mm]	2.51[mm]	0.36[mm]
	Esfuerzo máximo	243.5[MPa]	175.3[MPa]	177.9[MPa]
Carga lateral	Desplazamiento	2.453[mm]	1.047[mm]	0.34[mm]
	Esfuerzo máximo	183.1[MPa]	127.8[MPa]	79[MPa]
Masa de la estructura		2.396[kg]	2.535[kg]	1.86[kg]
Ancho de hombros		452[mm]	560[mm]	505[mm]
Características de aro	Distancia Aro - hombro	200[mm]	100[mm]	100[mm]
	Distancia parte superior	128[mm]	128[mm]	128[mm]
	Inclinación	0°	4.99°	12°

Por lo tanto, las modificaciones iterativas de la estructura dieron como resultado que, este último diseño de *rollbar* con delimitadores, redujera los esfuerzos en un 33.46 % en comparación de la estructura sin delimitadores como lo muestra la imagen 6.1.

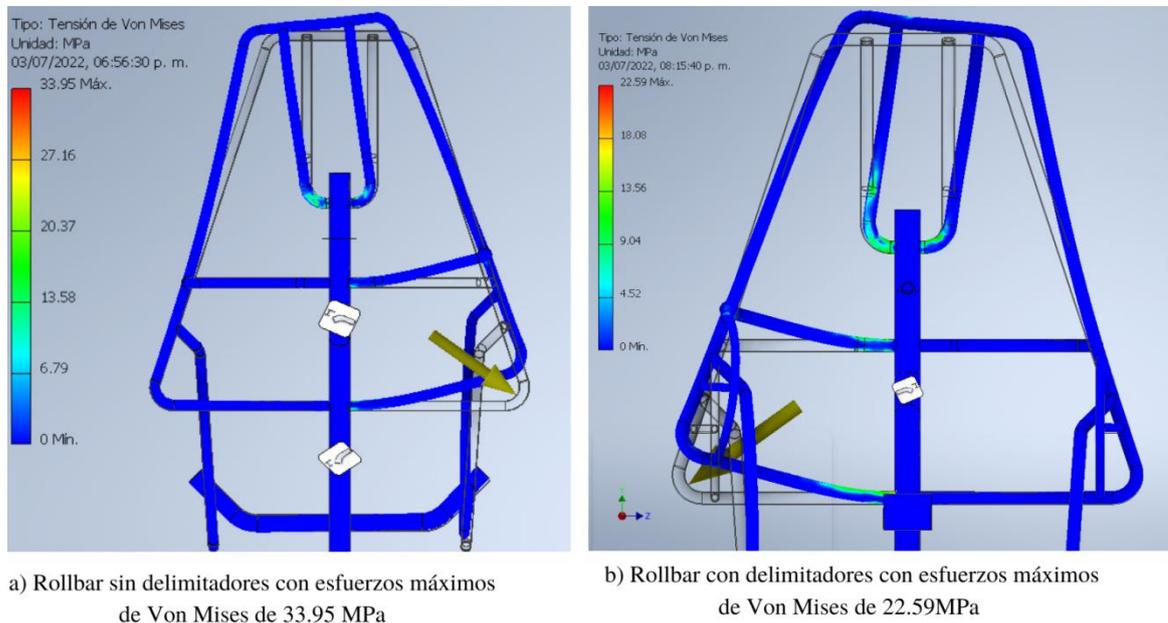


Imagen 6.1 Resultados de análisis estructural en caso de carga lateral al *rollbar* con y sin delimitadores.

Esto nos indica que existe la posibilidad de diseñar la estructura de *rollbar* disminuyendo el diámetro de tubo utilizado, analizando que sea posible el doblar en el calibre y diámetro del tubo propuesto.

La inclinación del aro fue un factor que modificó la resistencia mecánica de la estructura por lo que se podría buscar la inclinación óptima, haciendo análisis de elemento finito a diferentes inclinaciones del aro del *rollbar* bajo las mismas condiciones ergonómicas y de materiales con el objetivo de analizar resultados y obtener un patrón que seguir en los siguientes modelos.

Otra área de oportunidad es el material, ya que actualmente existe una diversidad de estos, con propiedades igual o mejor que el acero, como la fibras y resinas por ejemplo, pero este cambio dependería de las circunstancias, presupuesto y matriz QFD del equipo al momento de diseñar.

Pertener a una agrupación estudiantil complementa los conocimientos adquiridos en las aulas de clase, desarrollando una formación integral de ingenieros preparados para el mundo laboral al contemplar todo un proceso de diseño en ingeniería. Resolviendo retos reales siguiendo normas de diseño específicas y respetando aspectos desde la manufactura hasta la administración de tiempo y dinero del proyecto. Además, se desarrollan habilidades de trabajo en equipo, liderazgo, trabajo bajo estrés, comunicación asertiva de ideas, expresión profesional de conceptos de ingeniería, así como, habilidades para administrar tiempo de actividades extracurriculares en la vida cotidiana.

Referencias

- [1] ASME E-Fests (2021) [Internet]. Disponible en <https://efests.asme.org/competitions>
- [2] ASME SOMIM ITESCO (2011) [Internet] Disponible en <https://asmeitesco.wordpress.com/2011/11/17/que-es-el-human-powered-vehicle-challenge-hpvc/>
- [3] Cross, N. (2008). *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design* (4th ed.). Milton Keynes, UK: Wiley.
- [4] ASME, *Rules for the 2019 Human Powered Vehicle Challenge*, Septiembre 2018.
- [5] Grupo Promotor Acero [Internet] Disponible en <https://promotoresacereros.com/productos/>
- [6] Reglamento de ASME 2020
- [7] E. D. Bono, *Six Thinking Hats: An Essential Approach to Business Management*, UK TIME WARNER, 1988.

Anexos

A.3 Medidas de pilotos de temporada 2019

Tren superior	
	Medidas [mm]
Acroion height	1497
Bidetoid breadth	452.09
Thumbtip reach	730
Tren inferior	
Buttock knee length	590
Foot length	270
Sitting acromial height	600
Sitting eye height	760
Sitting height	885
Sitting knee height	530
Thigh clearance	152
Hip Breadth	423

A.5 Matriz QFD temporada 2021

