



# Title: Thermal-structural numerical analysis of the brake and disc system of a Formula SAE 2024 type vehicle

Authors: López-Flores, Jennifer Guadalupe, Cordero-Guridi, José de Jesus, Ovando-Cuevas, Enrique Romeo and Yescas-Ávila, Eber Alonso

Editorial label ECORFAN: 607-8695  
BCIERMMI Control Number: 2024-01  
BCIERMMI Classification (2024): 241024-0001  
RNA: 03-2010-032610115700-14  
Pages: 15

- Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla 0009-0005-0693-700X
- Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla 0000-0001-5201-1906
- Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla 0009-0005-2881-8976
- Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla 0009-0009-7698-525X

CONAHCYT classification:  
Area: Engineering  
Field: Engineering  
Discipline: Mechanical Engineering  
Subdiscipline: Applied Mechanics

ECORFAN-México, S.C.  
Park Pedregal Business. 3580,  
Anillo Perif., San Jerónimo  
Aculco, Álvaro Obregón,  
01900 Ciudad de México, CDMX,  
Phone: +52 1 55 6159 2296  
Skype: ecorfan-mexico.s.c.  
E-mail: contacto@ecorfan.org  
Facebook: ECORFAN-México S. C.  
Twitter:

www.ecorfan.org

Holdings		
Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic
Spain	El Salvador	Republic
Ecuador	Taiwan	of Congo
Peru	Paraguay	Nicaragua

# PRESENTATION CONTENT

Introduction

Methodology

Results

Annexes

Conclusions

References

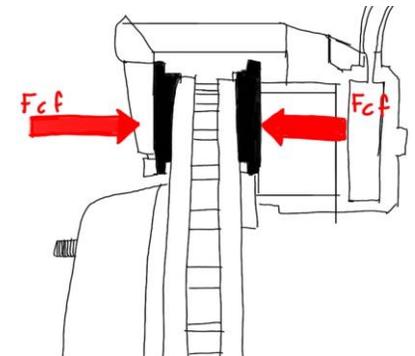
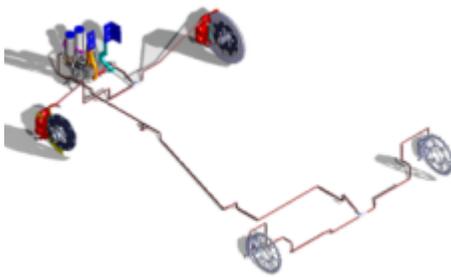


ECORFAN®

# Fórmula SAE: Un Desafío de Ingeniería



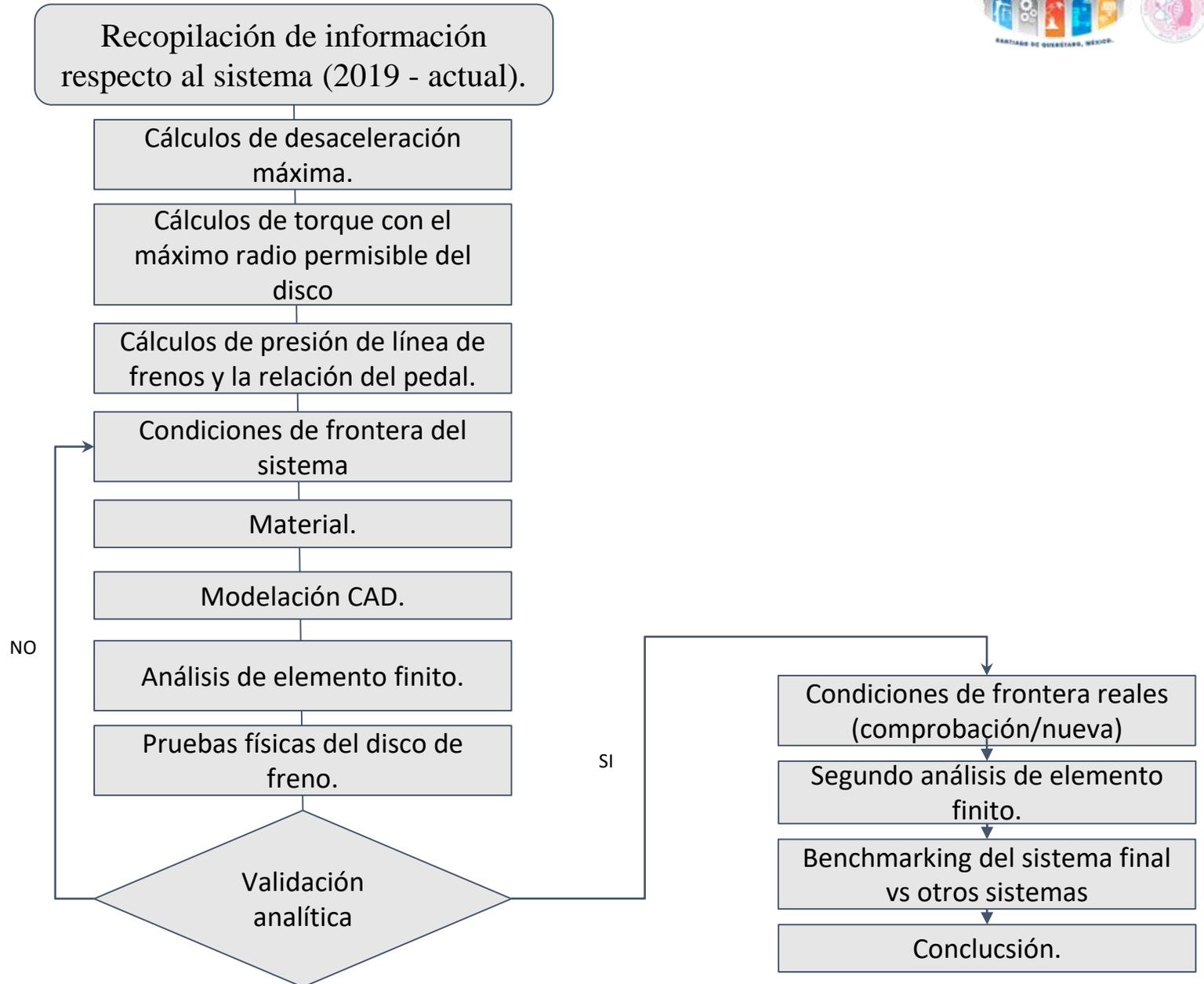
- Fórmula SAE es una competencia universitaria donde los estudiantes diseñan y construyen autos de carreras, promoviendo la innovación y el trabajo en equipo en ingeniería automotriz.
- Nuestro proyecto se enfoca en el sistema de frenos, un componente esencial para la seguridad del piloto. La optimización de su diseño es crucial para garantizar su eficacia y fiabilidad.
- El alcance de nuestro proyecto incluye: diseño y verificación del sistema, evaluación de fuerzas, análisis estructural, análisis térmico y comparación de materiales.





ECORFAN®

## NUESTRA METODOLOGÍA



El trabajo presentado se basó en un proceso por etapas, el cual comenzó con la información general del sistema, contando con información de años anteriores, posteriormente se tuvo la evaluación analítica del sistema y posteriormente, con la información global de los requerimientos técnicos, se desarrolló el análisis del disco de frenos.

Se decidió emplear las ecuaciones más representativas y que fueron la base para poder realizar los análisis de los discos de freno, y siendo reflejados en los resultados finales, no obstante, se explican los resultados de forma gráfica y escrita.

#### El coeficiente de fricción

Superficie del pistón del caliper =  $SPC$

Radio efectivo del disco =  $RE_D$

Torque de freno =  $TF$

Presión de fluido =  $PF$

$$\frac{1}{2 \times SPC \text{ (cm}^2\text{)} \times RE_D \text{ (m)}} \times \frac{TF \text{ (kgf}\cdot\text{m)}}{PF \text{ (kgf/cm}^2\text{)}} \quad [1]$$

#### Sumatoria de centro de gravedad

Como tenemos ambos ejes, tendremos que sacar su sumatoria para obtener la batalla.

$$(CG_{d,x}) = \frac{P_d}{P} \cdot L$$

$$(CG_{t,x}) = \frac{P_t}{P} \cdot L$$

$$CG_{d,x} + CG_{t,x} = L$$

[2]

#### Transferencia de pesos

Para determinar la transferencia de pesos, primero necesitamos encontrar el peso en cada eje.

Peso en la parte delantera y trasera:

$$Wf = \text{porcentaje del peso delantero} * W$$

$$Wr = \text{porcentaje del peso trasero} * W$$

Distancia a los ejes (delantero y trasero):

$$Lf = \frac{Wr * L}{W} \quad Lr = \frac{Wf * L}{W}$$

[3]

## Fuerza de frenado

Conocer la fuerza de frenado en cada caliper nos permitirá escoger el tipo de pinzas necesarias para las ruedas traseras y delanteras. El factor de seguridad (Sf) permitirá el bloqueo de las llantas lo cual es un requisito del reglamento.

$$F_{cf} = \frac{F_{tf}}{F_{dr}}$$

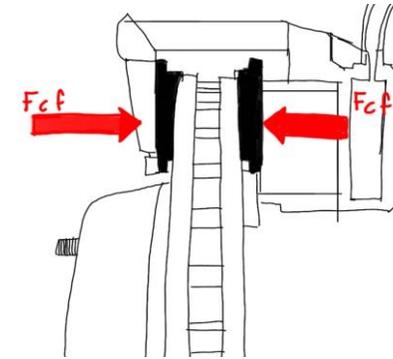
$$R_{cf} = \frac{F_{tr}}{R_{dr}}$$

$$\underline{F_{cfsf}} = F_{cf} \times S_f$$

$$\underline{R_{cfsf}} = R_{cf} \times S_f$$

$$\text{Presión en caliper frontal}(F_{cp}) = \frac{F_{cfsf}}{\pi * F_{cpr}^2 * n_p}$$

$$\text{Presión en caliper trasero}(R_{cp}) = \frac{R_{cfsf}}{\pi * R_{cpr}^2 * n_p}$$



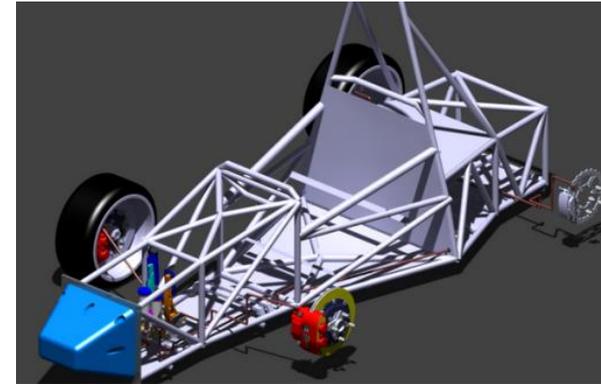
[9]

## Diámetro del disco de freno

Pft=par de frenado trasero, pfd=par de frenado delantero, Ffmax=fuerza de frenado máx. 
$$D = \frac{(pft+pfd)}{F_{fmax}}$$

## Descripción de propiedades generales del vehículo

Actualmente el diseño del vehículo ya cuenta con una carrocería y un diseño tipo Formula SAE del año 2023

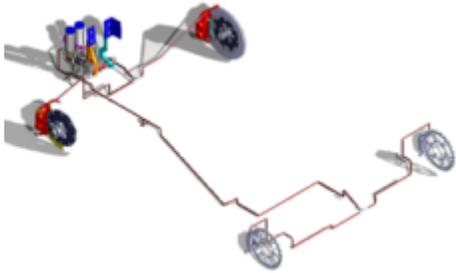


Adicionalmente tenemos como base las siguientes características que consideramos importante a tomar para la siguiente propuesta de la nueva carrocería 2024.

Propiedad	Valor	Unidad
Largo	1900	mm
Ancho	900	mm
Alto	600	mm
Peso	235	kg
Área	19.618	m <sup>2</sup>

## Configuración general del sistema de frenos SAE

A partir de propuestas previas de diseño y consideraciones típicas para el sistema, se optó por una configuración de 4 discos de freno (uno por cada llanta), y un sistema hidráulico.



## Desarrollo y selección de disco de frenos

Para la elección de los discos de freno para el vehículo Formula SAE, se realizaron diversos cálculos, para poder determinar cuáles serían la elección adecuada.

En las competencias Fórmula SAE, el diseño y la optimización de los discos de freno son aspectos críticos para garantizar un rendimiento óptimo y seguro del vehículo. Para lograr esto, se utilizaron una serie de datos que nos permiten calcular aspectos clave relacionados con la frenada y la distribución de peso.

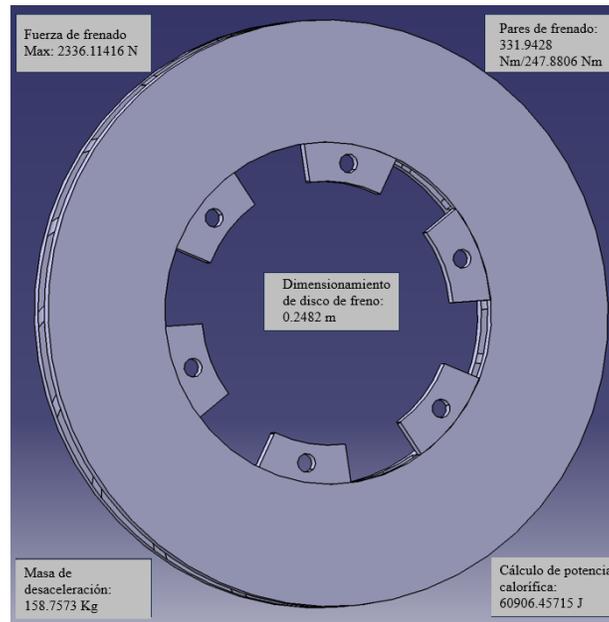
El radio de los neumáticos en 0.2482 metros, seguido de utilizar el valor de la gravedad de  $9.81 \text{ m/s}^2$ , y una altura calculada con el neumático de 0.2286 m.

El primer dato fundamental que empleamos se refiere a la distancia entre ejes, tomado en 1.52908 m.

Utilizando como referencia el tamaño del auto, la distribución de pesos de los ejes delantero y trasero fue de 34.82% y 65.18% respectivamente. Mientras que, las distancias del centro de gravedad a los ejes delanteros y traseros fueron de 100 mm y 53.43 mm.

Para comprender mejor la distribución de peso entre ejes, utilizamos ecuaciones que nos permiten calcular la fuerza del peso en el eje delantero y trasero. Conociendo el peso aplicado en cada eje y el peso total del vehículo, podemos determinar la distribución de fuerza en cada eje, lo que influye directamente en la capacidad de frenado y la estabilidad del vehículo.

Adicionalmente, la fuerza normal se calculó con un resultado en 2336.1141 N. Por otro lado, las fuerzas normales de los ejes se determinaron con 813.5213 N. y 1522.5928 N.



Para los efectos sobre el vehículo a causa de la desaceleración (TP) se calculó en 523.8794 N, y las fuerzas aplicadas en los ejes delanteros y traseros son de 1337.4007 N. y 998.7133 N.

## **Fuerza de frenado y selección de accesorios correspondientes**

En esta investigación, se emplearon ecuaciones para analizar la transferencia de peso en los ejes delantero y trasero, así como la fuerza de frenado, el par de frenado y la eficiencia de la fuerza de frenado, con el objetivo de seleccionar los discos de freno y las pinzas de freno más adecuadas.

Los resultados de los cálculos mostraron una transferencia de peso de 49% hacia el eje delantero durante la frenada, lo que indica la necesidad de una mayor capacidad de frenado en este eje.

La fuerza de frenado requerida en el eje delantero fue de 109 N, mientras que en el eje trasero fue de 204 N. Se determinó que el par de frenado necesario para detener el vehículo bajo condiciones de carga máxima era de 84 Nm. Además, se calculó una eficiencia de la fuerza de frenado del 170%.

## **Disco de freno**

Para la selección de los discos, las pastillas y los calipers, obtuvimos que estos debían ser de 248mm. Debido a que para tener estas medidas tendrían que ser fabricados de forma personalizada y la intención es utilizar modelos existentes que tengan disponibilidad en el mercado mexicano, se decidió elegir discos estándar con medidas de 200 mm de diámetro y 12 mm de ancho, para las ruedas traseras y delanteras respectivamente.

El tamaño de la pinza, obtuvimos como resultado que es necesario un caliper con 223.44647 kPa de presión para las pinzas delanteras y de 542.34077 kPa de presión para las pinzas traseras, incluyendo un factor de seguridad de 2.

Para determinar que Caliper se utilizará, se determinó el área de los pistones de los calipers delanteros y traseros, obteniendo 2026.8299 mm<sup>2</sup> y 1013.41495 mm<sup>2</sup> respectivamente.

Se utilizarán dos diferentes ya que por el reglamento de Fórmula SAE 2024 exige la división de dos circuitos individuales del sistema de frenos, en este caso trasero y delantero.

Para conocer si será necesaria la aplicación de un servomotor en el pedal de freno, se determinó la fuerza requerida para el accionamiento del pedal y obtuvimos una fuerza de 140.69 N por lo que no será necesaria la inclusión del sistema de ayuda.

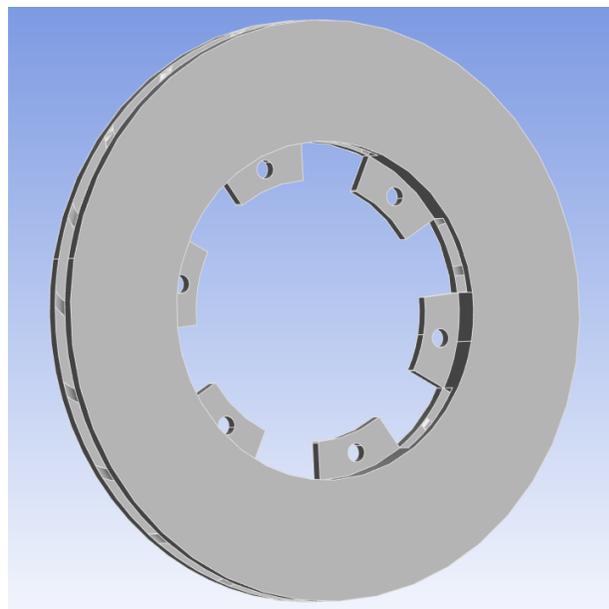
## Análisis de disco

Con los datos que hemos obtenido por medio de cálculos, hemos obtenido que, nuestro disco de freno debe contar con un diámetro aproximado de 177.47 mm, el área efectiva de frenado, la cual se obtiene en base al torque y presión máxima de frenado, es de 49476.27 mm<sup>2</sup> y se obtuvo en base a la energía térmica generada, la capacidad calorífica y la masa del disco.

Con base a los datos obtenidos, determinamos que el disco K238SS-200 de la marca Righetti Ridolfi, es la elección adecuada para nuestro vehículo, puesto que, cuenta con las características buscadas y que cuentan con validez en el reglamento vigente de Fórmula SAE.

Propiedad
"Vented Brake Disk 200x12mm Grooved"
Hierro fundido
Diámetro externo 200 mm
Grosor 12 mm. / 6 agujeros: 6,5 mm
Agujeros de distancia entre ejes 114 mm

*Fuente: Elaboración propia*



Para poder darle validez y sustento a nuestros cálculos, se decidió realizar estudios térmico-estructurales y modales al disco elegido.

Para el análisis, se desarrolló un modelo de elementos finitos:

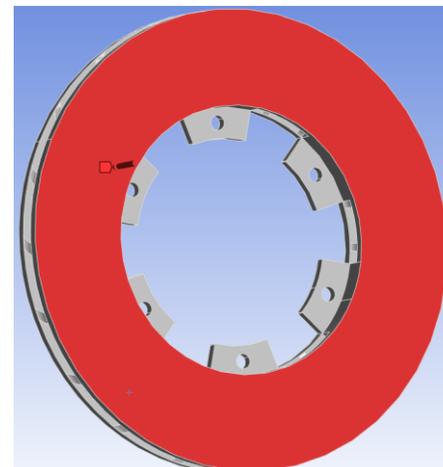
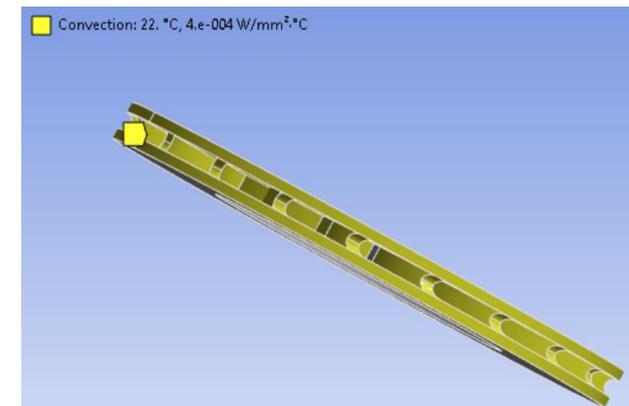
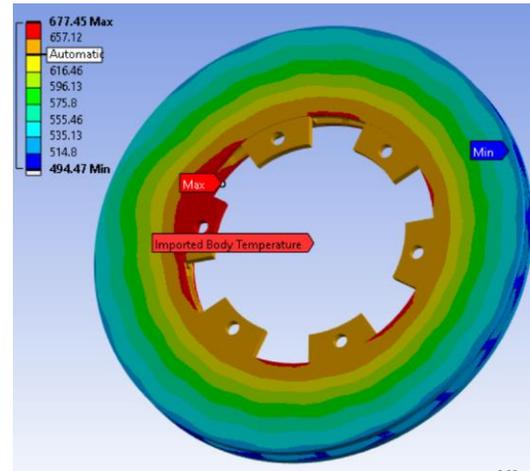
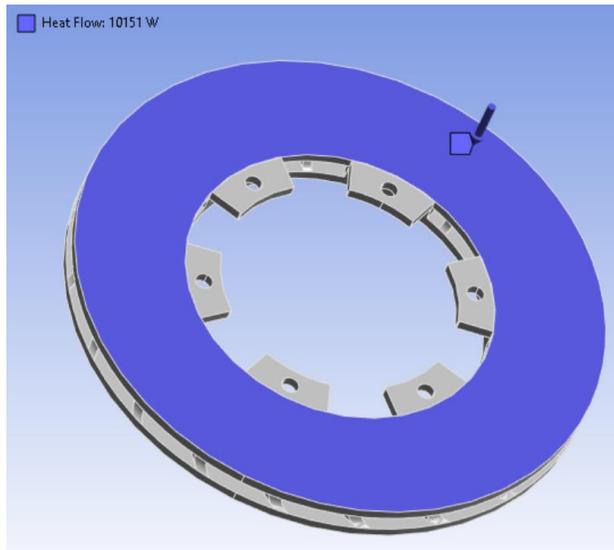
Análisis	Modal	Estático estructural
Tamaño de elementos	4	4
Tipo de elementos	tetraedros	tetraedros
Número de elementos de <u>mallado</u>	55960	55960
Calidad de elemento	5e-002	5e-002
Análisis	Modal	Estático estructural

*Fuente: Elaboración propia*

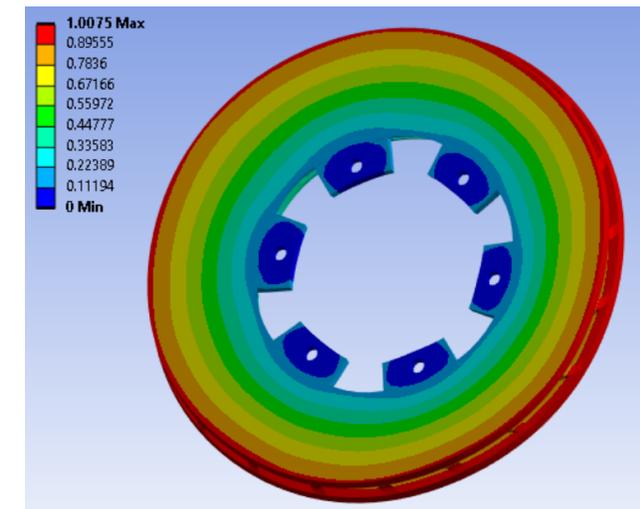
# Estudio térmico de disco de frenos

En el proceso de evaluación del disco seleccionado, se consideraron condiciones de operación del disco de frenos.

Resultados de las temperaturas máximas alcanzadas generadas por una temperatura ambiental de 22° C y una potencia calorífica originada en la frenada de 10,151.07619 Watts



En base a la presión empleada y la sujeción en los agujeros de los tornillos y su unión al sistema de frenos, además de las condiciones iniciales de la distribución de temperaturas, se obtuvo una deformación total de 1.0075 mm generada por la presión,



# Resultados

Para el análisis del disco, se modeló un CAD con las características más parecidas al modelo real. Construido de hierro fundido.

Se obtuvieron resultados estructurales y térmicos, a partir del análisis conjugado, los cuales se muestran en la tabla 5.

Resultados de estudio térmico-estructural del disco de frenos

Análisis	Valor máximo	Valor mínimo	Unidad
Térmico	677.45	494.47	°C
Estructural-térmico	1.0075	0.11194	mm
Estrés von-mises	6521.3	4.2042	Pa

La alta temperatura de 677 C° sugiere que el disco de freno está experimentando un calentamiento significativo durante su operación. Esta temperatura puede contribuir a la expansión térmica del disco, lo que a su vez causa la deformación máxima de 1.0075 mm. Es importante evaluar si esta deformación es aceptable en términos de las especificaciones de diseño y la funcionalidad del sistema de frenos.

A partir de estos resultados, se compararon los números finales con datos de otras universidades, teniendo la información mostrada en las tablas 6 y 7.

Comparativa de propiedades físicas de disco de frenos en proyectos Formula SAE

Universidad	Material	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Peso
UPAEP	Fundición de hierro	200-200	4	1.487
ULL ESIT	Aluminio 6061	202.66-157.64	15	1.15
Universidad Carlos III	Laminado de grafito	267-220	16.1	2.6
HTW Berlin	Acero AISI 4142	220-200	5	2.15
IPB	Aleación de aluminio	205-150	4	N/A
IPN	Acero inoxidable	220-142	3	0.721

Comparativa de datos de carga en disco de frenos en proyectos Formula SAE

Universidad	Capacidad de carga (N)
UPAEP	2336.11
ULL ESIT	3000
Universidad Carlos III	4500
HTW Berlin	2700
IPB	5305.45
IPN	5409.5

# Conclusiones

El equipo de Fórmula SAE de la UPAEP ha logrado optimizar el sistema de frenos de su vehículo de competición. A través de cálculos detallados y análisis técnicos, se seleccionaron nuevos discos de freno que cumplen con los requisitos de la competencia y son más económicos. La decisión de utilizar los mismos discos en las cuatro ruedas ha mejorado el rendimiento y la estabilidad del vehículo.

Los resultados obtenidos son prometedores, ya que las deformaciones del disco son aceptables y se cumplen los objetivos del proyecto. La siguiente fase consiste en construir e instalar físicamente el nuevo sistema para validar los cálculos teóricos.

Este proyecto no solo ha mejorado el rendimiento del vehículo, sino que también ha demostrado la importancia de un enfoque integral en la ingeniería y el beneficio de apoyar a proveedores locales. A futuro, se buscarán nuevas innovaciones en materiales y tecnologías para optimizar aún más el sistema de frenado.

# Referencias

CARPIO, D. E. (2018). DISEÑO y PRODUCCIÓN DEL SISTEMA DE FRENOS DE UN VEHÍCULO DE COMPETENCIA FORMULA SAE ELECTRICO [TESIS, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15358/1/UPS-CT007549.pdf>

Catálogo de llantas | Buscar tiendas en línea | Llantas Bridgestone. (s. f.). [https://www.bridgestone.com.mx/catalogo/size/205-55r16/?cid=paidsearch\\_googlesearch\\_bscon-mexico\\_tm16\\_hrd\\_HRD2024\\_clicks\\_measure16\\_20555r16\\_texto\\_hrd2024&gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQiA2eKtBhDcARIsAEGTG42Fbw-BGe2pH7pqRHBTJlmwH9YodwjD88XpI17iD-K2eARQEn9Wrs8aAtP-EALw\\_wcB](https://www.bridgestone.com.mx/catalogo/size/205-55r16/?cid=paidsearch_googlesearch_bscon-mexico_tm16_hrd_HRD2024_clicks_measure16_20555r16_texto_hrd2024&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA2eKtBhDcARIsAEGTG42Fbw-BGe2pH7pqRHBTJlmwH9YodwjD88XpI17iD-K2eARQEn9Wrs8aAtP-EALw_wcB)

Llantas 195 / 45 R16, Índice de carga: 84 , índice de velocidad: V - Automóvil | Michelin. (s. f.). <https://www.michelin.com.mx/auto/browse-tyres/by-dimension/195/45/16/84/V>

Obringer, Auston; Kucera, Robert; Massarelli, Steven; John, Jared; and Finer, Michael, "Additive Manufactured Formula SAE Brake Caliper" (2021). Williams Honors College, Honors Research Projects. 1419.

[https://ideaexchange.uakron.edu/honors\\_research\\_projects/1419](https://ideaexchange.uakron.edu/honors_research_projects/1419)

Fanci, E. (2022). Functional design of the braking system of a Formula SAE car (M. Palpacelli, Ed.) [Tesis Functional design of the braking system of a Formula SAE car].

<https://www.bing.com/ck/a?!&&p=3407b8f467573094JmltdHM9MTcxODQwOTYwMCZpZ3VpZD0wODZhOGZiNi03ZTYwLTZINjUtMDU1Zi05YjJjN2YwMzZmZDgmaW5zaWQ9NTE4OA&ptn=3&ver=2&hsh=3&fclid=086a8fb6-7e60-6e65-055f-9b2c7f036fd8&psq=Progettazione+funzionale+dell%e2%80%99impianto+frenante+di+una+vettura+di+Formula+SAE&u=a1aHR0cHM6Ly90ZXNpLnVuaXZwbS5pdC9iaXRzdHJlYW0vMjAuNTAwLjEyMDc1LzExNzI5LzIvVGVzaSUyMEVtYW51ZWxlJTlWcmFuZ2kucGRm&ntb=1>



**ECORFAN®**

© ECORFAN-Mexico, S.C.

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- ([www.ecorfan.org/](http://www.ecorfan.org/) booklets)