

Facultad de Arquitectura e Ingeniería

Maestría en Diseño Mecánico
Mención Fabricación de Autopartes de Vehículos

Diseño y construcción de soporte inferior del amortiguador para suspensión delantera independiente tipo Macpherson

Luis Raúl Martínez Peñafiel

Director Dr. Edilberto Llanes Cedeño,
Codirector Ing. Juan Carlos Rocha M.Sc.

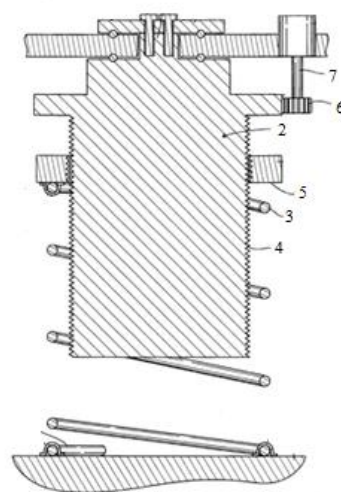
INTRODUCCIÓN

Antecedentes

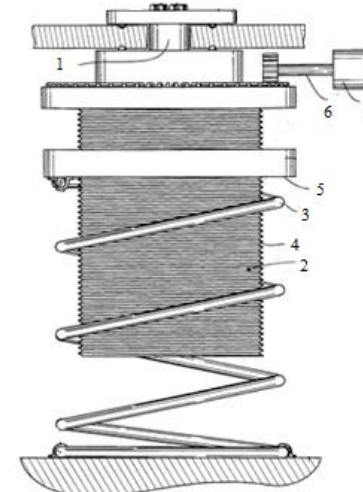
Planteamiento del Problema

Objetivos

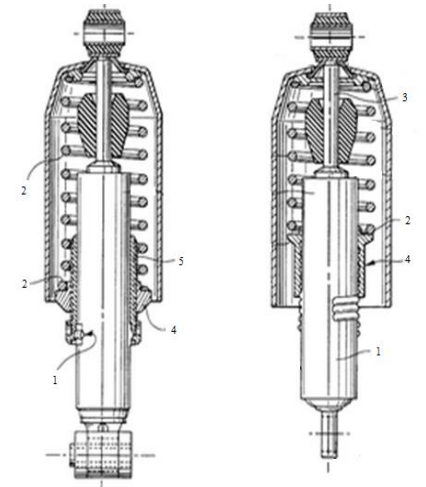
- Modificaciones ANTI – TÉCNICAS
- Ecuador parque automotor a nivel nacional 228 276 automóviles, Chevrolet Aveo y Sail 15 % del total de participación (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2014)
- PNBV, Plan Toda una Vida (Matriz Productiva)



(Ericson, 1996)



(Bell, 1999)



OBJETIVO GENERAL

- Construir el soporte inferior del amortiguador de suspensión delantera independiente tipo *Macpherson*, a partir de un diseño apropiado, con la aplicación del análisis computacional y pruebas en ruta, para la conversión de la suspensión fija convencional del vehículo en ajustable, con elementos existentes en el país

OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Analizar la interacción de las partes componentes de la suspensión tipo *Macpherson*,
- Identificar el método de análisis asistido por computador necesario para el diseño del soporte de suspensión.
- Modelar el soporte inferior del amortiguador para la suspensión delantera independiente tipo *Macpherson* ajustable, necesario para la aplicación de análisis computacional.
- Construir el soporte del amortiguador que permita el ajuste de altura del vehículo.
- Validar los resultados mediante comparación de los resultados obtenidos.
- Evaluar el desempeño del componente generado en funcionamiento.

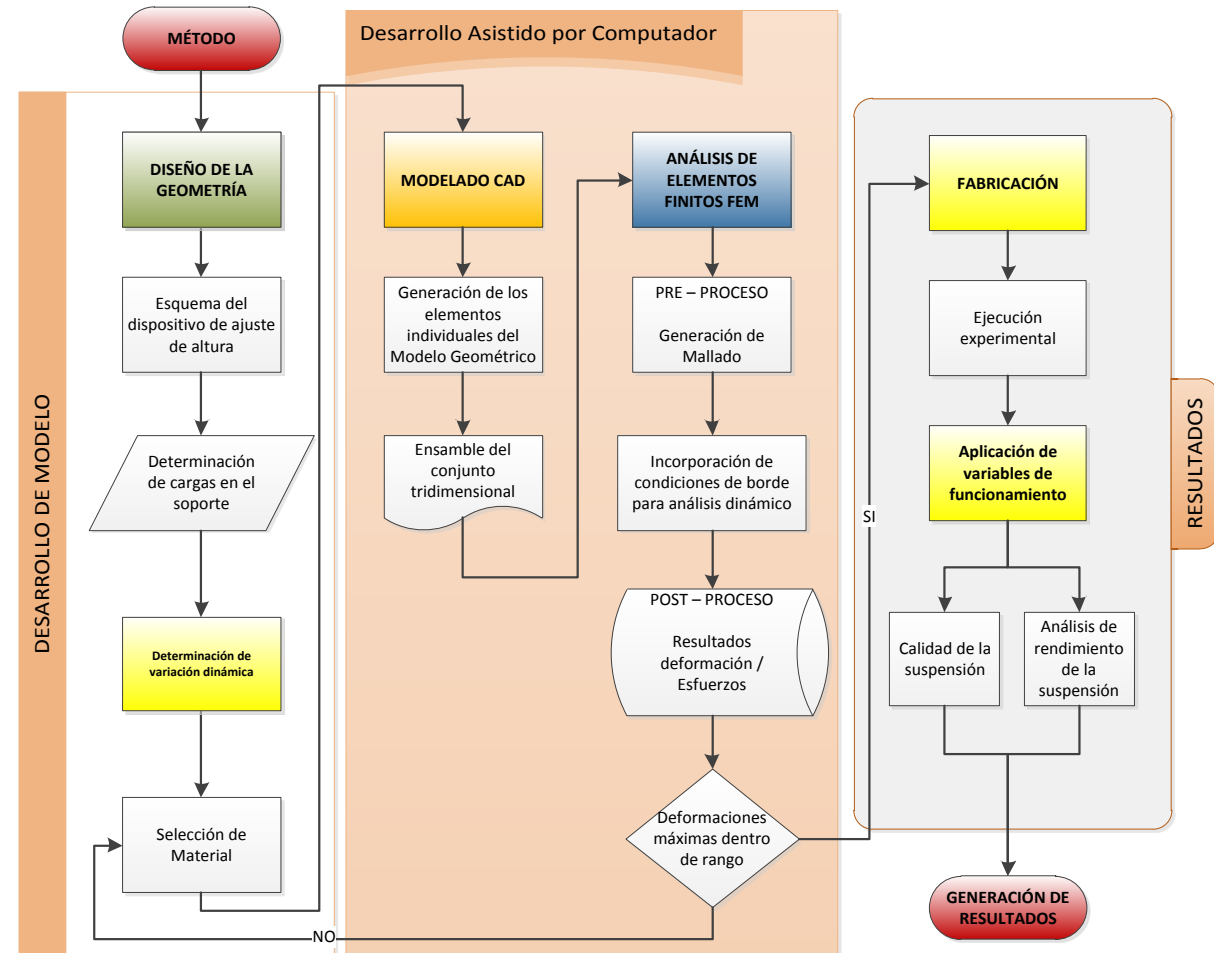
MÉTODO

Tipo

- Investigación Cuantitativa
- Investigación Aplicada de Campo
- Explicativa

Métodos Aplicados

- Histórico – Lógico
- Análisis – Síntesis
- Experimentación



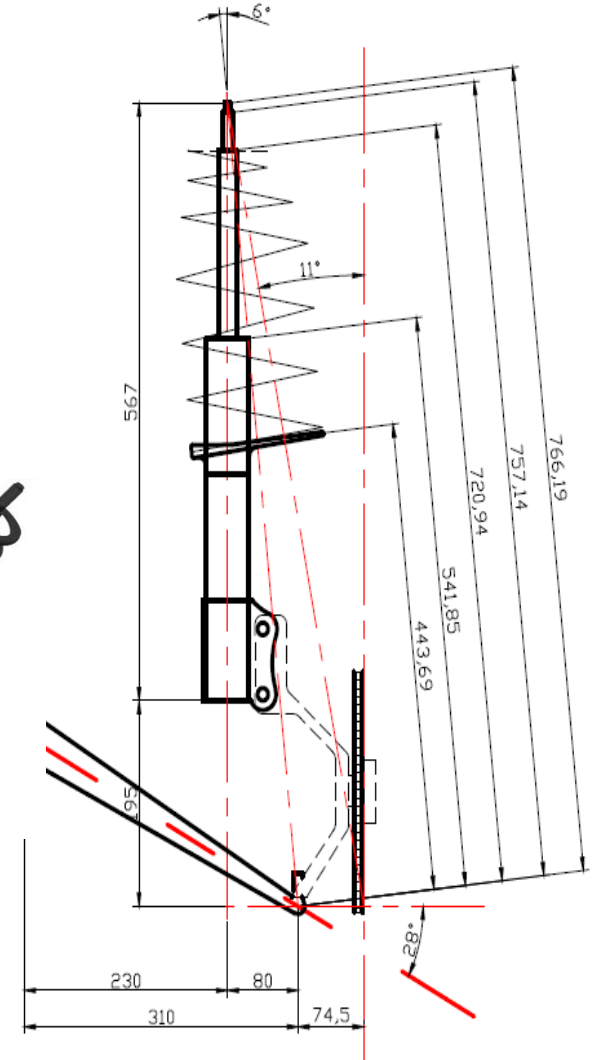
DISEÑO DE LA GEOMETRÍA

Pesos Chevrolet Sail por eje

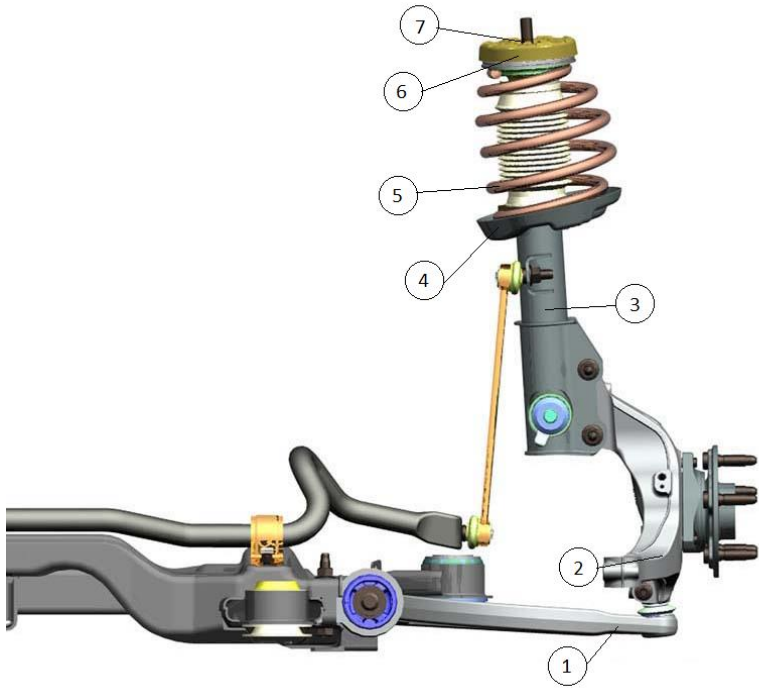
Descripción	Detalle
Eje delantero izquierdo	325 kg
Eje delantero derecho	325 kg
Eje delantero	650 kg
Eje posterior izquierdo	392.5 kg
Eje Posterior derecho	392.5kg
Eje Posterior	785 kg

Parámetros de trabajo suspensión

Detalle	Valor	Detalle	Valor
F_{cp}	325.00 kg - 1300 kg	F_{dl}	28.84 kg - 115.36 kg
Θ	28°	F_{du}	1.64 kg - 6.03 kg
ϕ	11°	F_k	367.22 kg - 1468.89 kg
β	6°	F_{strut}	369.25 kg - 1476.98 kg
α	0°	$F_{masa\ no\ susp}$	10 kg
a	178 mm		
b	250.96 mm		
x	1 mm		

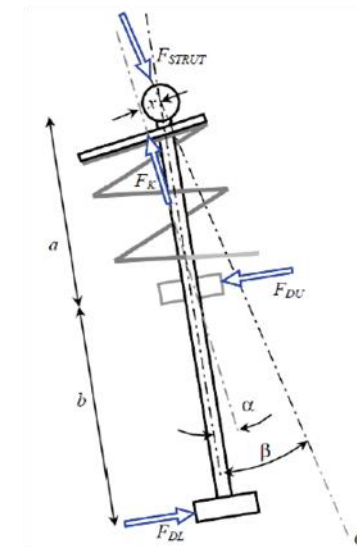
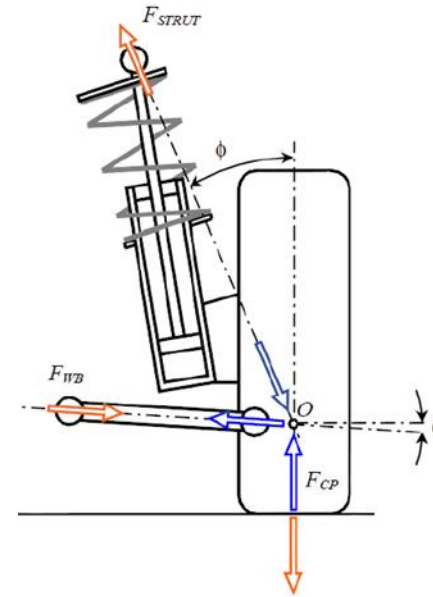


SUSPENSIÓN MACPHERSON



<i>Detalle de Elementos</i>	
Ítem	Descripción
1	Brazo Inferior
2	Mangueta de dirección
3	Soporte Central
4	Base inferior del resorte
5	Resorte
6	Goma superior
7	Eje del amortiguador

(Alonso, 1996)



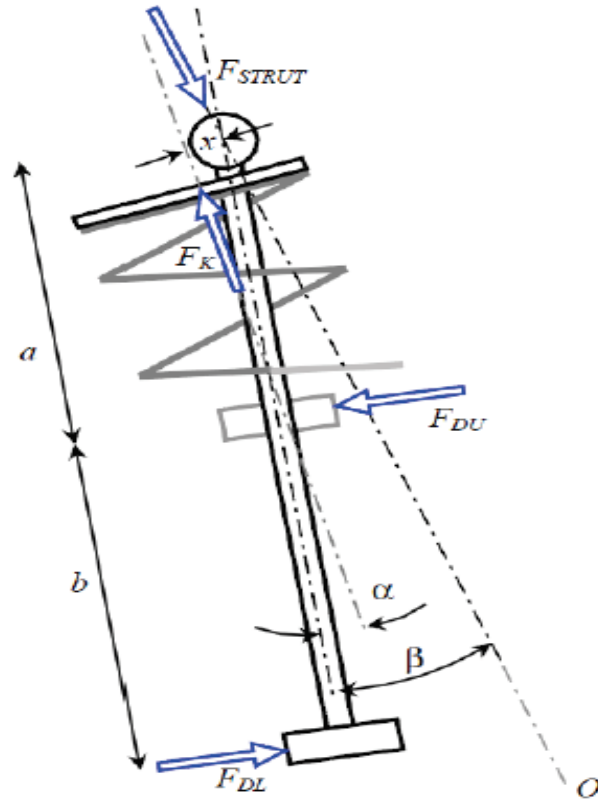
(Wale & Shah, 2013)

Factores de cargas dinámicas

Tipo de carga	Factor de carga		
	Longitudinal	Transversal	Vertical
Empuje en baches Delantero / posterior	3g en la rueda afectada	0	4g en la rueda afectada 1g en las demás ruedas
Empuje en curvas	0	0	3.5g en la rueda afectada 1g en las demás ruedas
Empuje lateral en golpe de cunetas	0	4g Ruedas delanteras y posteriores en el lado afectado	2g en ruedas frontales
Frenado de emergencia	2g en ruedas frontales 0.4g n ruedas posteriores	0	0.8g en Ruedas posteriores

(Happian -Smith, J. 2002)

DETERMINACIÓN DE CARGAS



$$F_{strut} = \frac{F_{CP} \cdot \cos \theta}{\cos(\phi + \theta)}$$

$$F_k = \frac{F_{strut} \cdot \cos \beta}{\cos \alpha}$$

$$F_{dl} = \frac{F_{strut}}{b} * \left[\frac{\cos \beta \cdot x}{\cos \alpha} - a \left(\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \alpha} \right) \right]$$

$$F_{du} = F_{strut} \left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \cdot \frac{x}{b} - \left(\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \alpha} \right) \cdot \left(\frac{a}{b} + 1 \right) \right)$$

(Wale & Shah, 2013).

SELECCIÓN DE COMPONENTES ----- Amortiguador



Comparación de materiales para elaboración del soporte central

Ítem	Detalle		Volkswaguen Gol 01 - 10	Suzuki Forza II	Toyota Camry 91 - 94
1	Carrera del vástago	170 mm	180 mm	190 mm	161 mm
2	Longitud total	567 mm	580 mm	590 mm	577 mm
3	Longitud cámara	340 mm	360 mm	400 mm	415 mm
4	Diámetro exterior	50 mm	43 mm	45 mm	41.5 mm
5	Diámetro del vástago	20 mm	20 mm	18 mm	22 mm
6	Roscado	M14 x 1.5mm	M14x1.5 mm	13x1.5 mm	16x1.5mm
7	Longitud de roscado	42 mm	42 mm	35 mm	45 mm
8	Carga de soporte	325 kg	350 kg.	250 kg	365 kg

Material del soporte

ISSF International Stainless Steel Forum encargada de recomendar el uso de materiales basados en acero - uso en partes estructurales de chasis el material más adecuado es el acero AISI 304 y AISI 304L (ISSF, 2018).

Aleación de aluminio 6061 utilizada comúnmente para la fabricación de partes de suspensión de automóviles (Inagaki, 2007)

Comparación de características materiales

Ítem	Detalle	AISI 304	ASTM A366	AISI 4340
1	Módulo de Young (GPa)	200	190	190
2	Coefficiente de elongación (%)	8 - 43	22	12-22
3	Resistencia a la fatiga (MPa)	210 - 440	200	330-740
4	Coefficiente de Poisson	0.28	0.29	0.29
5	Cumplimiento de especificaciones %	100%	71%	74%

Nota: Especificaciones materiales Material Properties Database (05 de 02 de 2018). Obtenido de <https://www.makeitfrom.com/compare/AISI-304-1.4301-S30400-Stainless-Steel/SAE-AISI-4340-SNCM439-G43400-Ni-Cr-Mo-Steel>

Roscado

$$A_t = \frac{F_e}{0.4 * S_Y} \quad \text{(Faires, 1995).}$$

Área de esfuerzo a la tracción de 0.0811 pulg² (52.32 mm²), diámetro nominal mínimo de 10 mm
Área de 1.012 pulg² (652.90 mm²) para el aluminio 6061; diámetro nominal mínimo de 33 mm para el aluminio.

ROSCA Diámetro 60 mm y paso 4 mm un diámetro interior de 55.09 mm.

Rosca cuadrada ya que todos los esfuerzos los transmite de forma paralela con respecto al eje
(Sandvik Coromant, 2007)

Resistencia a la Tracción $\sigma_{Trac} = \frac{4F}{\pi \cdot d_c^2}$

Cizallamiento de la rosca $\tau = \frac{P}{\pi \cdot d \beta H}$

Aplastamiento de la rosca $\sigma_{aplast} = \frac{4P}{\pi \cdot (d^2 - d_1^2) k_m Z}$

$$d_r = d - 1.226869 * p$$

(Dobrovolski, 1970)

Modelado Tri dimensional

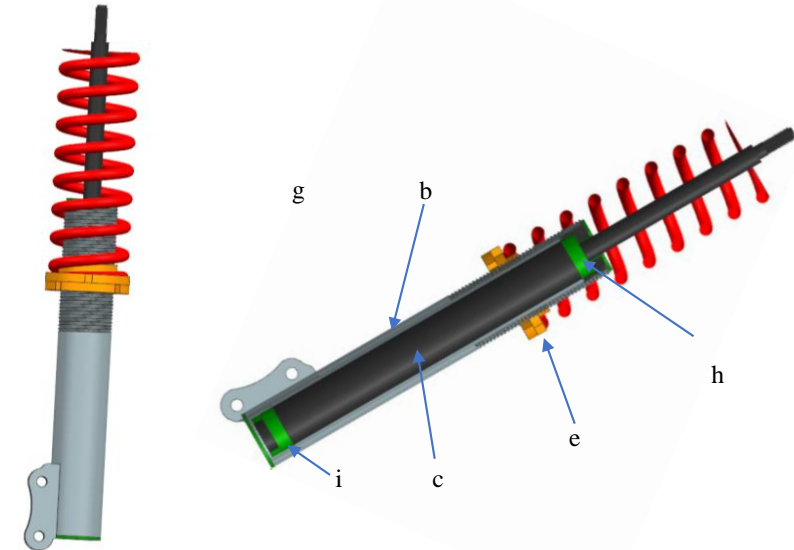
Software Siemens NX

Respuesta Modal Versus respuesta directa NX Nastran

Características	Análisis Modal	Análisis Directo
Modelos pequeños		X
Modelos grandes	X	
Pocos pasos de tiempo		X
Gran cantidad de pasos de tiempo	X	
Alta frecuencia de excitación		X
Amortiguación normal		X
Alta precisión		X

Nota. Recomendaciones de aplicación análisis dinámico transitorio modal vs directo. Adaptado de “Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. (2014). Basic dynamic analysis user's guide. Plano TX, USA: Siemens Industry Software.

- Malla Estructurada
- Tetraédrica 3D
- 10 Nodos
- La selección de la malla se basa en obtener una malla que ayude a obtener resultados que se aproximen más a la realidad.
- Mayor sea el número de nodos de nuestra malla, y por tanto de elementos, se obtendrán mejores resultados,
- Exceso de nodos puede afectar en el procesamiento
- Densidad de nodos tan grande puede generar mejoras mínimas
- Gasto computacional excesivo.



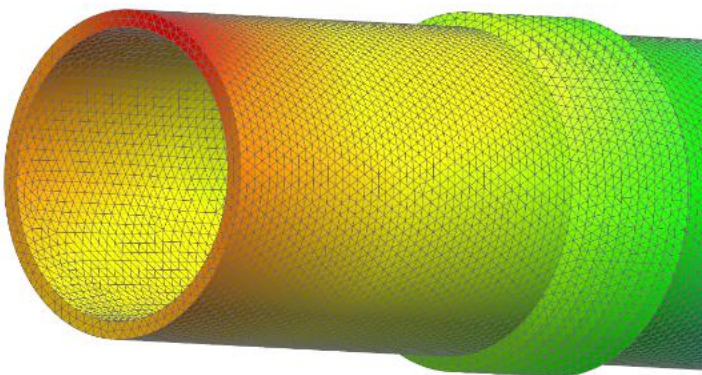
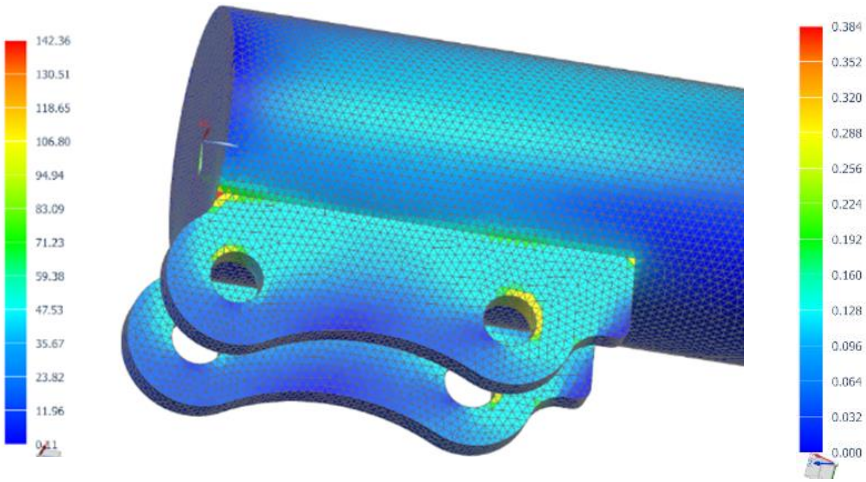
Detalle de Elementos

Ítem	Descripción
a	Ensamble total
b	Soporte central
c	Amortiguador Volkswagen gol
d	Resorte para coilover
e	Tuerca de retención
f	Contratuerca de soporte
g	Placa de soporte
h	Tuerca del amortiguador
i	Tope inferior

(de Vehi Sarrazin, 2016)

Manipulaciones Experimentales

Etapa	Detalle	Variables dependientes	Variables independientes
Etapa 1	Simulación dinámica en estado transitorio	Resistencia del soporte	- Aluminio 6061 - Acero AISI 4340



Etapa 2

Metrología de
aceleración / Calidad de
la suspensión



Validación del sensor

- Medición simultánea con banco homologado

Frecuencia

- Chevrolet *Sail*
- Superficie irregular controlada.
- Original, altura estándar

Frecuencia

- Chevrolet *Sail*
- Superficie irregular controlada.
- Original con regulación, altura estándar.

Frecuencia

- Chevrolet *Sail*
- Superficie irregular controlada.
- Alterna con regulación, altura estándar.

Frecuencia

- Chevrolet *Sail*
- Superficie irregular controlada.
- Original con regulación, altura modificada 1.

Frecuencia

- Chevrolet *Sail*
- Superficie irregular controlada.
- Alterna con regulación, altura modificada 1.

Etapa 3

Análisis banco
homologado

Cumplimiento
Normativa RTV - DMQ

Suspensión original

Suspensión con resorte
coilover



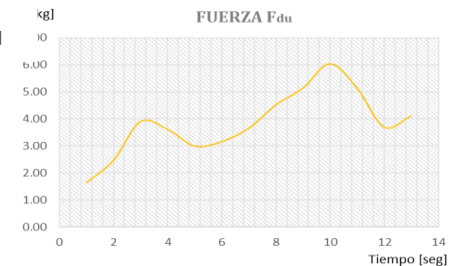
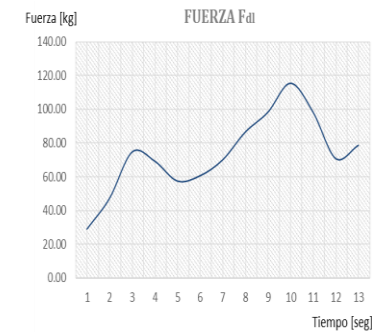
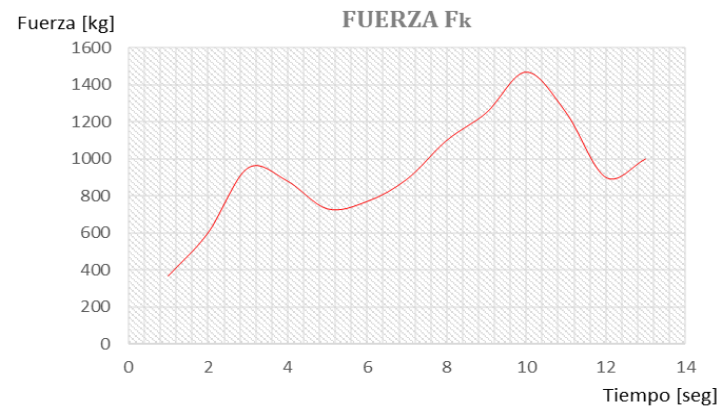
RESULTADOS

Cargas en el sistema de suspensión

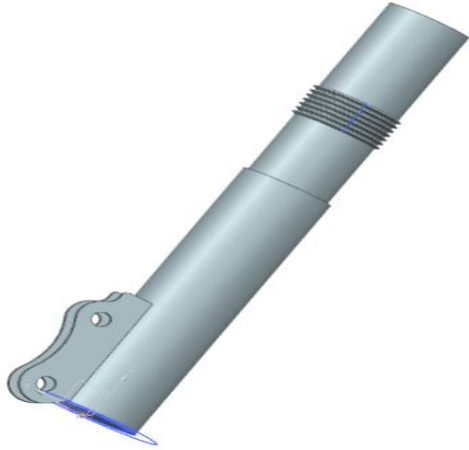
Tabla de valores cargas dinámicas

Tiempo(s)	F_k		F_{dl}		F_{du}	
	[kg]	[N]	[kg]	[N]	[kg]	[N]
0	367,22	3602.43	28,84	282.92	1,64	16.09
1	600,00	5886.00	47,12	462.26	2,46	24.16
2	950,00	9319.50	74,61	731.91	3,90	38.26
3	880,00	8632.80	69,11	677.98	3,61	35.44
4	730,00	7161.30	57,33	562.42	3,00	29.40
5	770,00	7553.70	60,47	593.23	3,16	31.01
6	890,00	8730.90	69,90	685.69	3,65	35.84
7	1100,00	10791.00	86,39	847.48	4,52	44.30
8	1250,00	12262.50	98,17	963.04	5,13	50.34
9	1468,89	14409.81	115,36	1131.68	6,03	59.15
10	1250,00	12262.50	98,17	963.04	5,13	50.34
11	900,00	8829.00	70,68	693.39	3,69	36.24
12	1000,00	9810.00	78,54	770.43	4,11	40.27

Nota: Valores obtenidos del vehículo para las cargas del soporte de suspensión en referencia a memoria técnica de cálculo mostrada en el anexo D (Elaboración propia, 2017)



Modelado

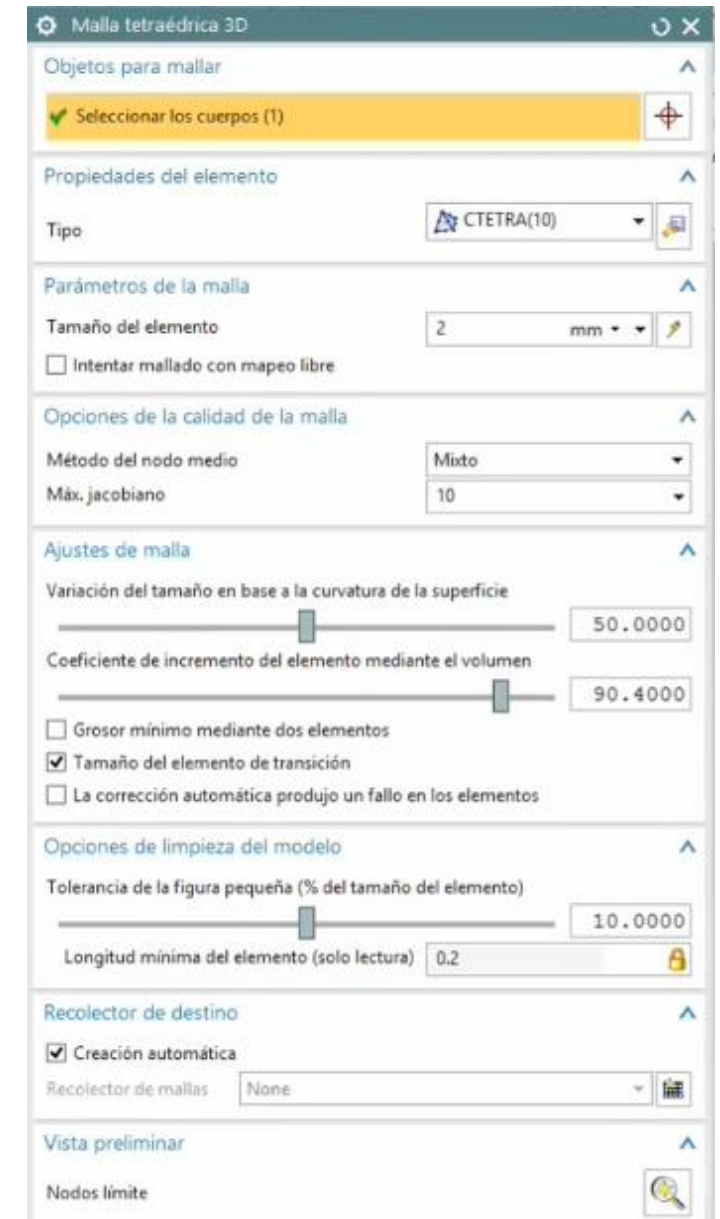


Mallado

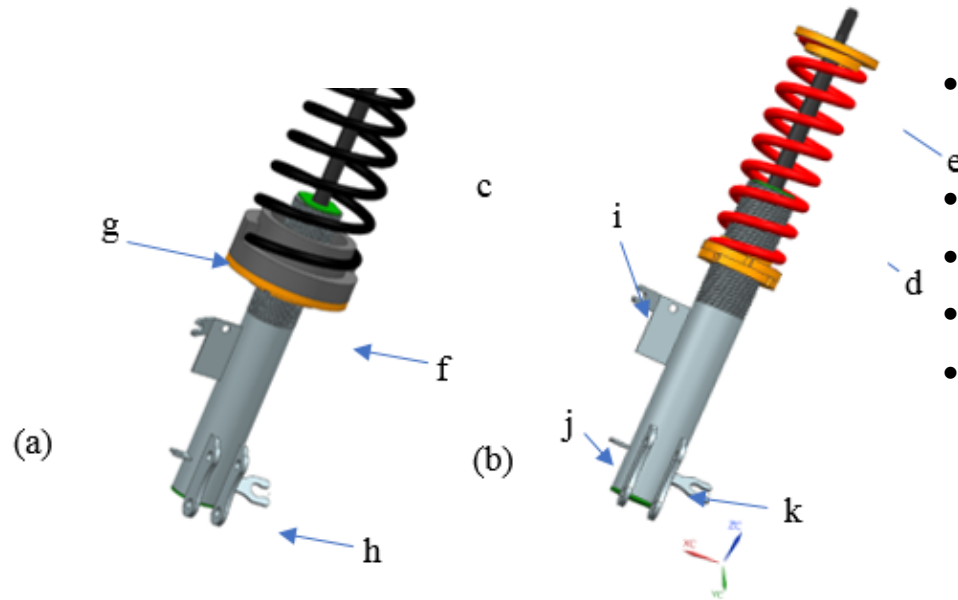


Tabla de resultados calidad del elemento

Parámetros	Elementos fallidos	Elementos con advertencias	Valor promedio	Valor crítico
Número de elementos	0	0		
Índice Jacobiano	0	0	1	1
Proporción de aspecto	0	0	2.01	9.92
Número total de elementos analizados		162268		



Prototipo



Resultados Roscado

- ROSCA Diámetro 60 mm y paso 4 mm un diámetro interior de 55.09 mm.
- Resistencia a la tracción $\sigma_{Trac} = 42.93 \text{ kg/cm}^2$
- Resistencia con margen de seguridad de 3.3 $\sigma_{Trac} = 141.69 \text{ kg/cm}^2$
- Cizallamiento $\tau = 37.11 \text{ kg/cm}^2$
- Aplastamiento $\sigma_{aplast} = 67.04 \text{ kg/cm}^2$

AISI 4340 = 70 kg/cm²

Resultados Cálculo esfuerzos

$$\sigma_a = \sqrt{\sigma_{xa}^2 + \sigma_{ya}^2 + \sigma_{xa} * \sigma_{ya} + 3\tau_{xya}^2}$$

- Tensión efectiva combinada Von Mises
- Esfuerzos axiales, normales y cortantes en tubería.

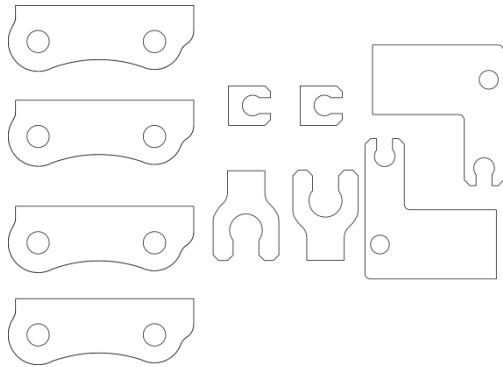
$$\sigma_a = 15.774 \text{ MPa.}$$

Detalle de Elementos	
Ítem	Descripción
a	Ensamble total con resorte original
b	Ensamble total con resorte alterno
c	Resorte original <i>chevrolet sail</i>
d	Resorte para <i>coilover</i>
e	Placa de tope superior
f	Placa de apoyo inferior
g	Caucho de nivelación
h	Placa de soporte estabilizador
i	Placa de soporte cañería de frenos
j	Placa soporte cable sensor VSS
k	Placa de soporte

Proceso de Fabricación

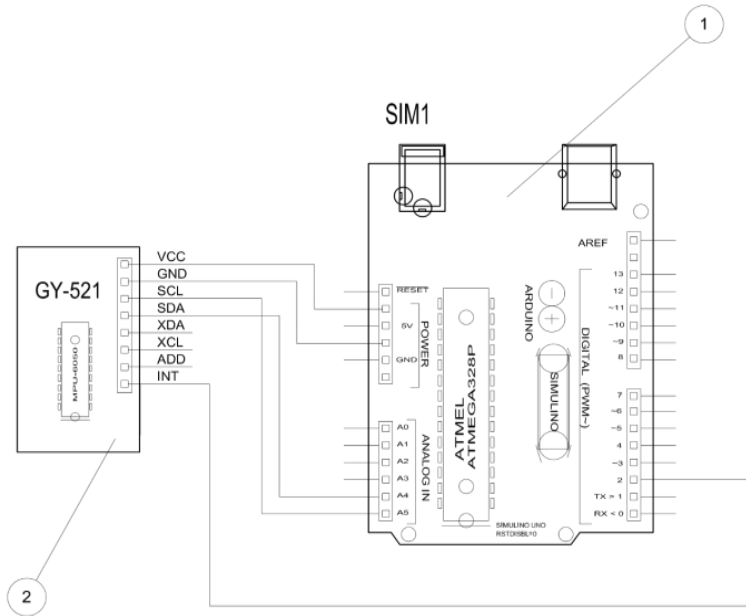
Tabla de operaciones de mecanizado para la fabricación del soporte

Nº	Operación	Longitud de trabajo	Tiempo de mecanizado
1	Mecanizado rosca exterior ϕ 60 mm paso 4 mm	150 mm	3.00 min
2	Mecanizado rosca interior ϕ 52 mm paso 2 mm	30 mm	1.00 min
3	Cilindrado exterior placa de tope inferior	27 mm	2.50 min
4	Refrentado placa de tope	60 mm	1.30 min
5	Cilindrado interior guía para centrado	24 mm	1.00 min
6	Cilindrado exterior, tuerca / contratuerca	22 mm	1.88 min
7	Roscado interior tuerca contratuerca	22 mm	2.5 min
8	Cilindrado placa de tope superior	10 mm	1.5 min
9	Cilindrado placa de sujeción resorte original	22 mm	1.5 min
10	Roscado interior placa de sujeción.	22 mm	1.5 min
11	Corte con plasma de planchas acero para soportes.	-	8 min
12	Ensamble de planchas de sujeción	-	30 min





Metrología



prueba Arduino 1.8.3

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

prueba

```
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050.h"
#include "Wire.h"

// La dirección del MPU6050 puede ser 0x68 o 0x69, dependiendo
// del estado de ADO. Si no se especifica, 0x68 estará implícito
MPU6050 sensor;

// Valores RAW (sin procesar) del acelerómetro y giroscopio en los ejes x,y,z
int ax, ay, az;
int gx, gy, gz;

void setup() {
  Serial.begin(57600); //Iniciando puerto serial
  Wire.begin(); //Iniciando I2C
  sensor.initialize(); //Iniciando el sensor

  // wait for ready
  Serial.println("UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK");
  Serial.println("Suspensión Ajustable ---- Sensor de Aceleración ---- LRMP");
  Serial.println(F("Presionar ENTER para iniciar lectura de datos"));
  while (Serial.available() && Serial.read()); // empty buffer
  while (!Serial.available()); // wait for data
  while (Serial.available() && Serial.read()); // empty buffer again
}
```

COM3 (Arduino/Genuino Uno)

Enviar

```
UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK
Suspensión Ajustable ---- Sensor de Aceleración ---- LRMP
Presionar ENTER para iniciar lectura de datos
Inicialización de sensor...
ax ay az Caster Camber
-0.17 3.92 -0.42 -2.43 83.51
-0.04 0.97 -0.12 -2.51 82.81
-0.04 0.98 -0.11 -2.05 83.19
-0.05 0.98 -0.12 -2.74 82.34
-0.04 0.98 -0.12 -2.35 82.78
-0.04 0.98 -0.12 -2.48 82.40
-0.04 0.98 -0.11 -2.51 83.07
-0.04 0.98 -0.12 -2.15 82.57
-0.04 0.97 -0.12 -2.23 82.91
-0.04 0.98 -0.12 -2.20 82.89
-0.03 0.98 -0.12 -2.02 82.93
-0.04 0.98 -0.12 -2.40 82.65
-0.04 0.97 -0.12 -2.25 82.46
-0.04 0.98 -0.12 -2.09 82.72
-0.05 0.98 -0.13 -2.66 82.24
-0.04 0.98 -0.11 -2.40 83.45
-0.04 0.98 -0.12 -2.19 82.53
-0.04 0.98 -0.12 -2.34 82.76
-0.04 0.98 -0.12 -2.61 82.59
-0.04 0.98 -0.13 -2.29 82.36
-0.04 0.97 -0.11 -2.15 83.09
-0.04 0.98 -0.11 -2.37 82.96
-0.04 0.98 -0.11 -2.47 83.08
-0.04 0.98 -0.12 -2.19 82.94
-0.04 0.98 -0.12 -2.39 82.84
-0.04 0.98 -0.11 -2.17 83.07
-0.04 0.98 -0.12 -2.39 82.61
-0.05 0.98 -0.12 -2.71 82.39
```

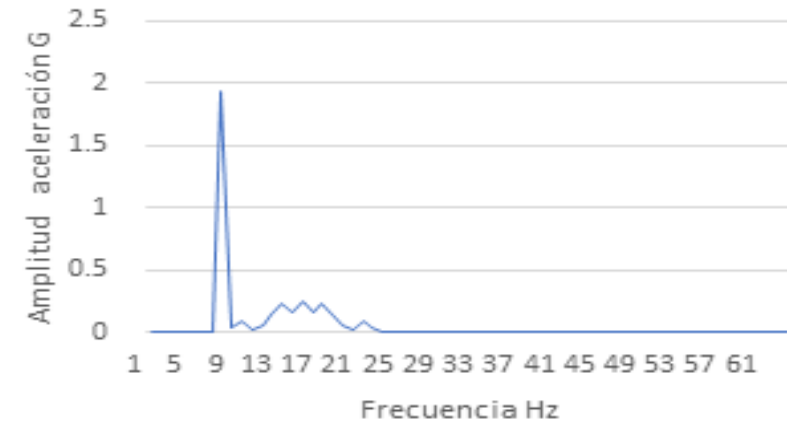
Autoscroll Sin ajuste de línea 57600 baudio Clear output

Arduino/Genuino Uno en COM3

Validación del sensor



ANÁLISIS DE ESPECTROS FFT

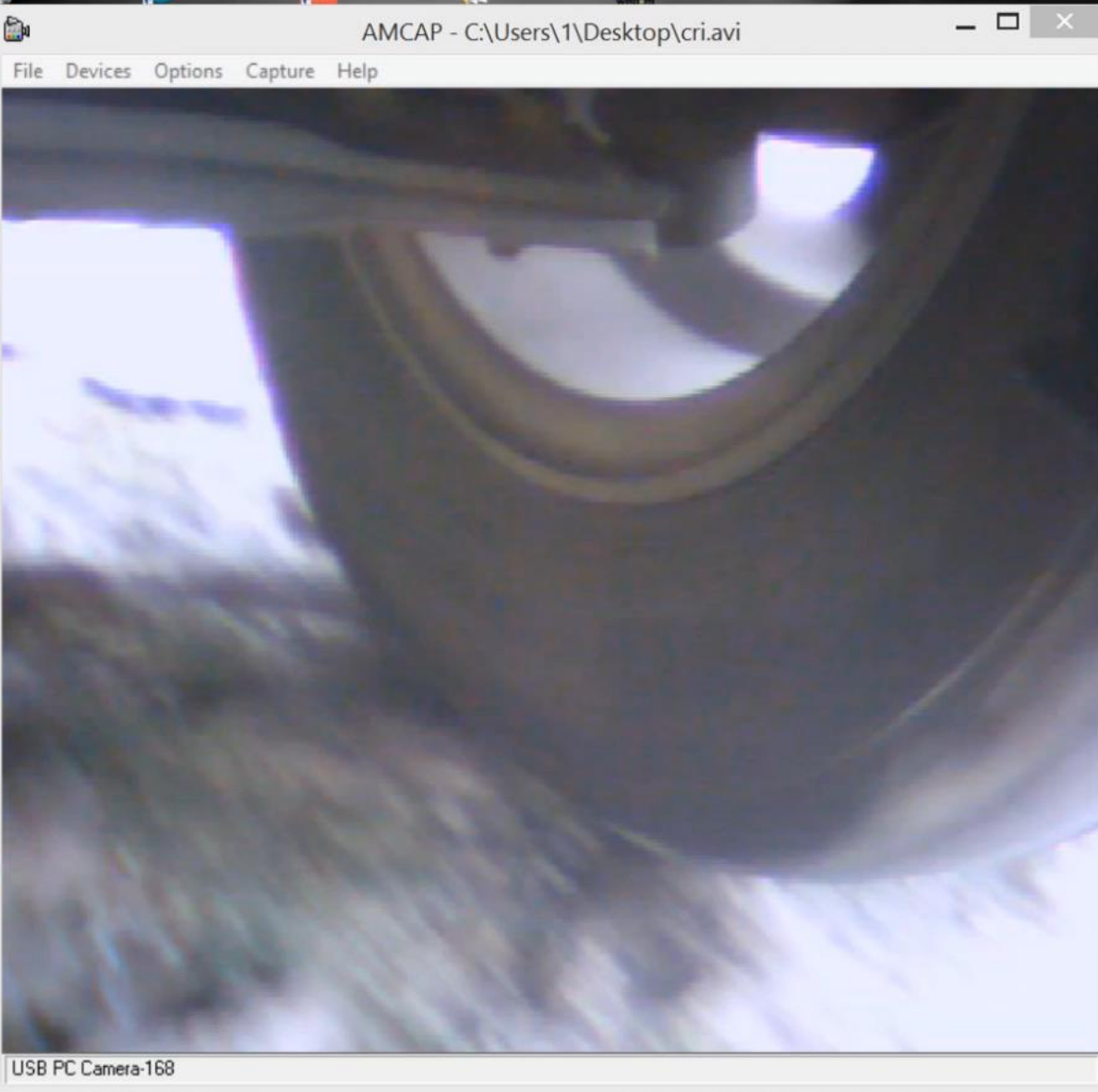


FICHA DE RESULTADOS MEDICIÓN DE ACCELERACIÓN				PÁG. 429
UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK	FICHA			N° 5-081
MARCA	Chevrolet	SUSPENSIÓN TIPO	MACHESIÓN DELANTERA	
MODELO	Opel	PRUEBA ACCELERACIÓN SUSPENSIÓN DELANTERA		
TIPO	Impulso	CONFIGURACIÓN ORIGINAL ELEVACIÓN		
AÑO	2012			
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS				
	Constante elástica resorte (a) k	mm	mm	
	Constante elástica resorte (b) k	mm	mm	
	Diámetro / longitud del resorte	mm	mm	
	Desplazamiento guardafango piso A	mm	mm	
	Distancia rueda guardafango B	mm	mm	
	Dureza de Pasado vehículo	mm	mm	
Ubicación sensor	Soporte amortiguador <input type="checkbox"/> Carrocero <input type="checkbox"/>			
PERFIL DE RODADURA				
GRABO		ESPECIFICACIONES		
		COTA	VALOR	UNIDAD
				mm
				mm
				mm
ACCELERACIÓN EN X				
ACCELERACIÓN EN Y				
ACCELERACIÓN EN Z				
GRÁFICO GLOBAL DE ACCELERACIÓN EN TRES EJE X, Y, Z				
RÉPLICA 1 				
ACCELERACIÓN EN X	Series 1	Series 2	Series 3	
ACCELERACIÓN EN Y	Series 1	Series 2	Series 3	
ACCELERACIÓN EN Z	Series 1	Series 2	Series 3	

Frecuencia Resultante de la rueda derecha de 9.72 Hz,
 Frecuencia Medida 9.323 Hz y una aceleración de 1.9 fuerzas de gravedad G

Error absoluto de 0.397 Hz
 4.080 % de diferencia,
 Error relativo de 0.04 % (Mendoza, 2012)

Valor de aproximación adecuado 10 % (Huerta, Echeverry, & Calle, 2018)



COM3 (Arduino/Genuino Uno)

```
UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK
Suspensión Ajustable ----- Sensor de Aceleración ---- LRMP
Presionar ENTER para iniciar lectura de datos
```

Enviar

Autoscroll Sin ajuste de línea 57600 baudio Clear output

uino 1.8.3

Asistencia Ayuda

```
er 0x68 o 0x69, dependiendo
cífica, 0x68 estará implícito

celerometro y giroscopio en los

do puerto serial
do I2C
do el sensor

ERNACIONAL SEK");
table ----- Sensor de Aceleraci
ER para iniciar lectura de dato:
rial.read(); // empty buffer
// wait for data
rial.read(); // empty buffer a

al.println("Inicialización de s
niciar el sensor");
az Caster Camber");
6050_ACCEL_FS_8); //configuraci
```

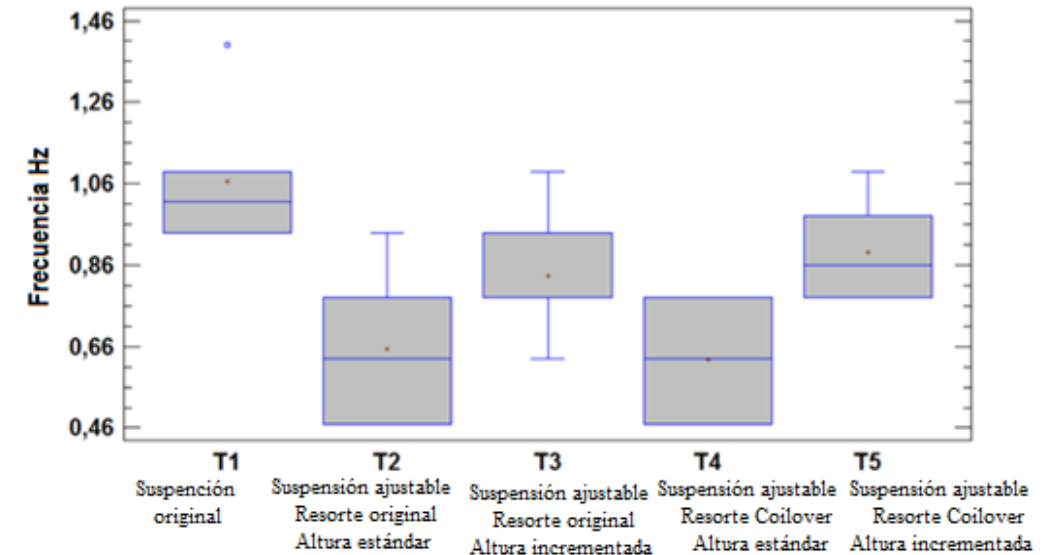
Arduino/Genuino Uno en COM3

Calidad de la suspensión

Tratamientos de evaluación experimental (Promedios)

Frecuencias [Hz]	Suspensión original, altura estándar (T1)	Suspensión original con regulación, altura estándar (T2)	Suspensión original con regulación, altura modificada 1 (T3)	Suspensión alterna con regulación, altura estándar (T4)	Suspensión alterna con regulación, altura modificada 1 (T5)
Valor promedio	1.066	0.65	0.83	0.63	0.89

Nota: Detalle de tratamiento experimental de variables con identificación de siglas aplicadas en análisis estadístico para los tratamientos T1, T2, T3, T4 y T5 con respecto a las variaciones experimentales S1, S2, S3, S4, S5 (Elaboración propia, 2017)



Whole-Body Vibration Calculator

Daily Vibration Exposure A(8)

 K-factor included in input values

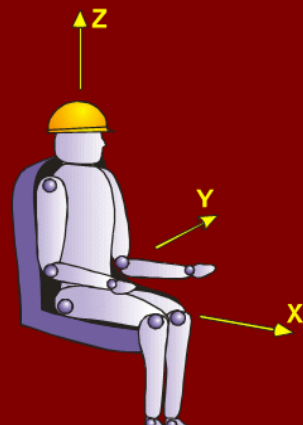
Operation description	Measured or estimated vibration magnitude		
	a _w x-axis m/s ²	a _w y-axis m/s ²	a _w z-axis m/s ²
	0.6867	0.05886	19.47

Daily exposures, A(8)
Daily exposures, points
Time to EAV/ELV
Points per hour

Exposure time	
hours	mins
	0.11

Partial Daily Vibration Exposures		
A(8) x-axis m/s ² A(8)	A(8) y-axis m/s ² A(8)	A(8) z-axis m/s ² A(8)
0.01		0.29
Total A(8) exposures		
0.01		0.29
Daily Vibration exposure, m/s ² A(8)		
0.29		

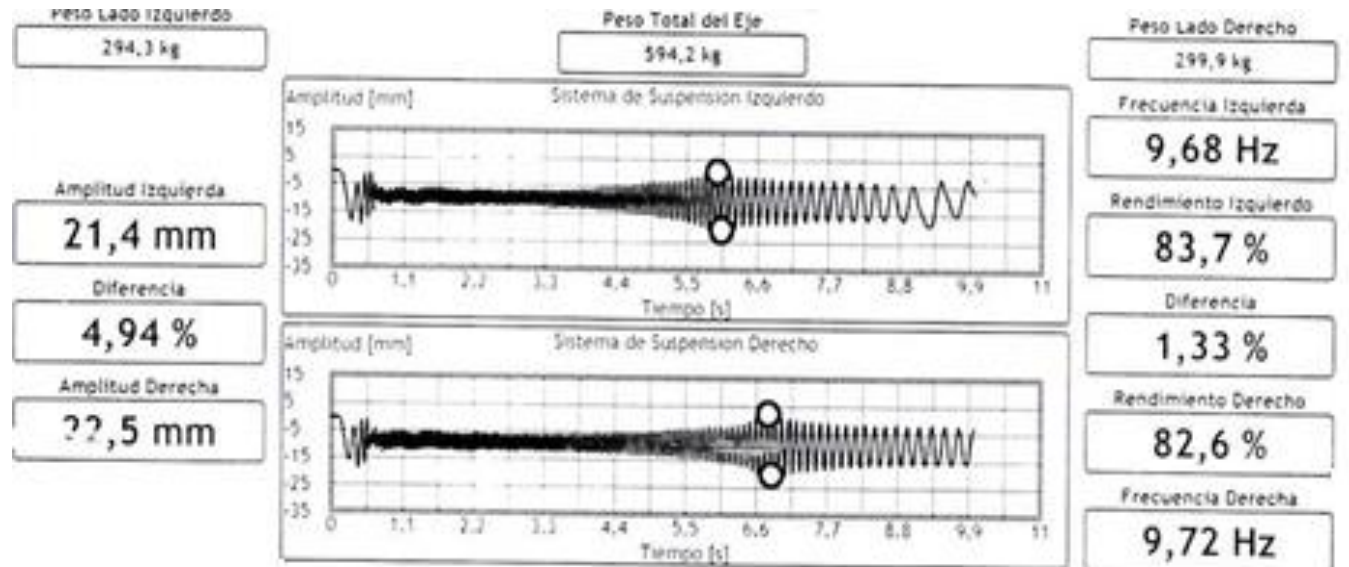
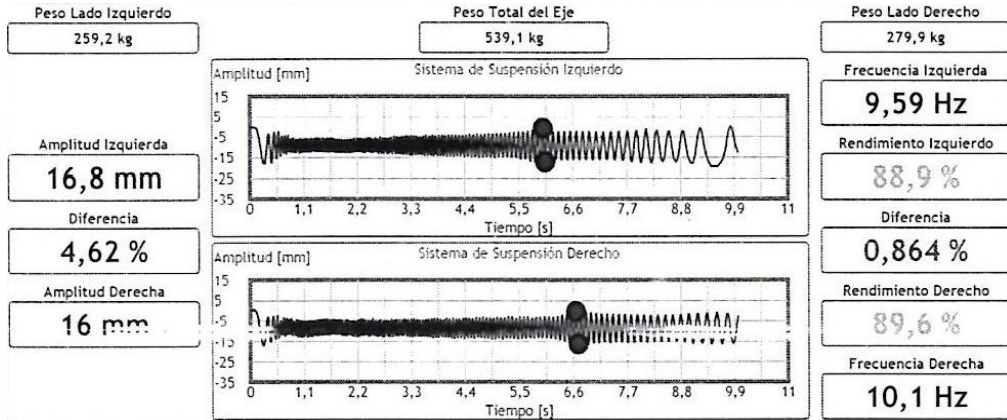
Copy descriptions from VDV calculator



- Reset calculator
- Go to VDV calculator
- Print
- HELP
- Re-size screen

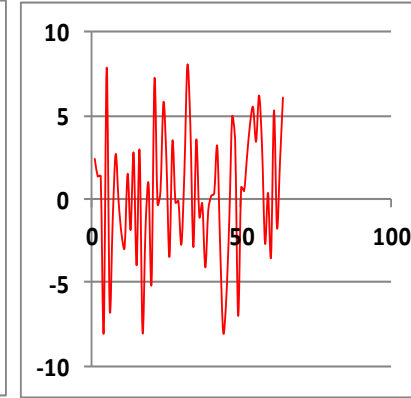
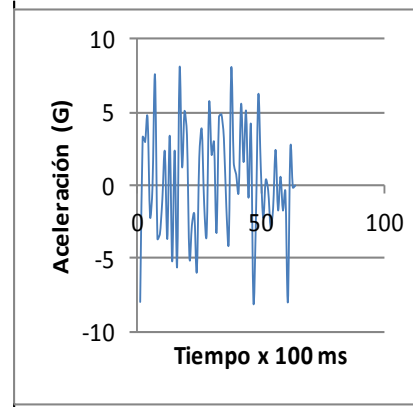
Colour key	
Less than EAV (0.5 m/s ² A(8)):	
EAV (0.5 m/s ² A(8)) or higher:	
ELV (1.15 m/s ² A(8)) or higher:	

Evaluación de cumplimiento normativa RTV - DMQ



ANÁLISIS DE RESULTADOS

Aceleración

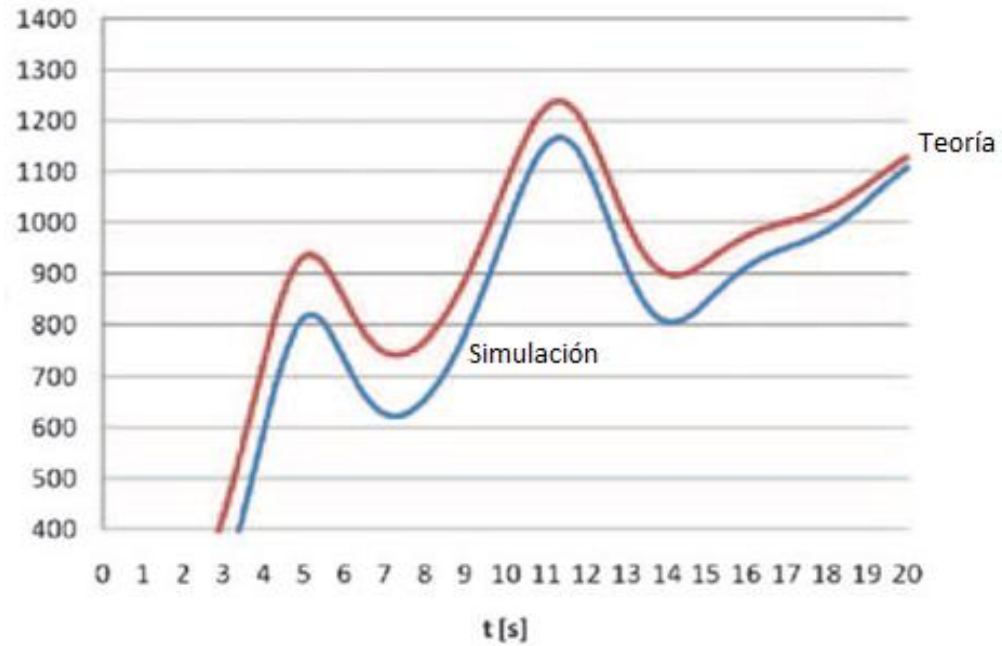


REPLICA	ACELERACIÓN [G]			FRECUENCIA [Hz]
	X	Y	Z	Y
1	-0.2	1.84	0.08	3.4
2	-0.4	3.40	0.09	4.7
3	-0.5	3.28	0.4	1.9
4	-0.1	2.09	0.05	3.8
5	0.3	2.20	0.39	3.8
6	0.0	1.76	0.01	2.8

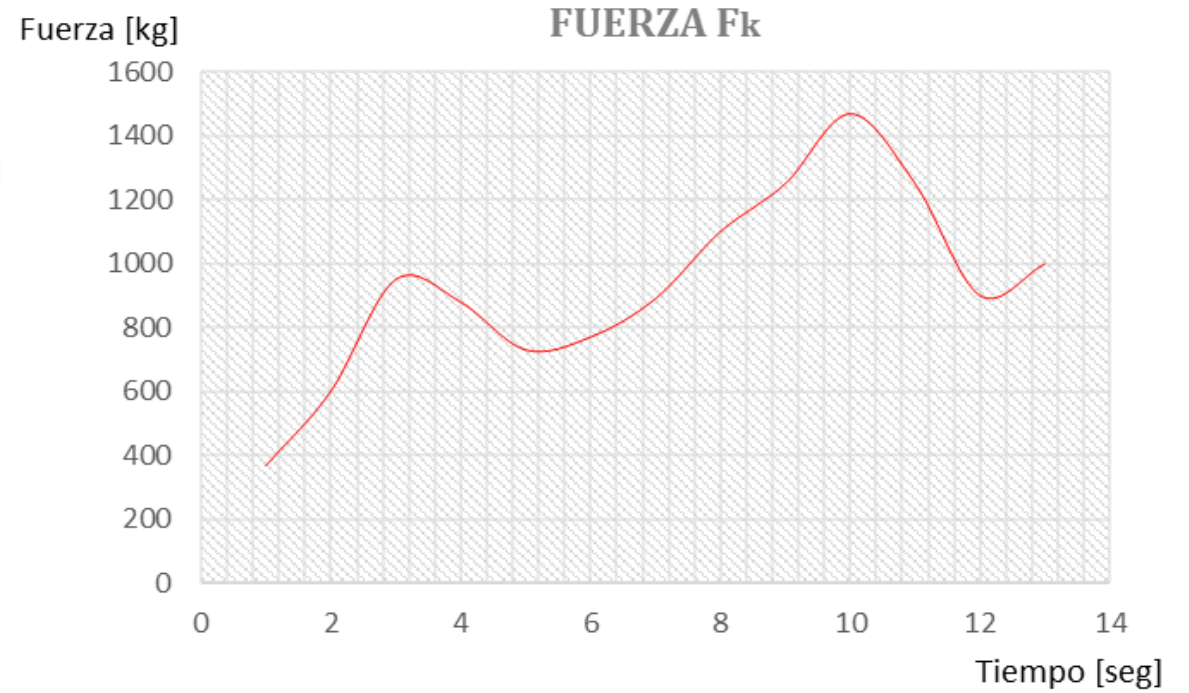
Comparación de datos experimentales con factores de carga de Happian y Smith

ÍTEM medido	Valor	Factores de cargas dinámicas Happian y Smith	
			Valor
Aceleración crítica 1	3.4 g	Empuje en baches delantero / posterior	4 g
Aceleración crítica 2	3.28 g	Empuje en curvas	3.5 g
		Empuje lateral en golpe de cunetas	2 g

Cargas en el sistema de suspensión

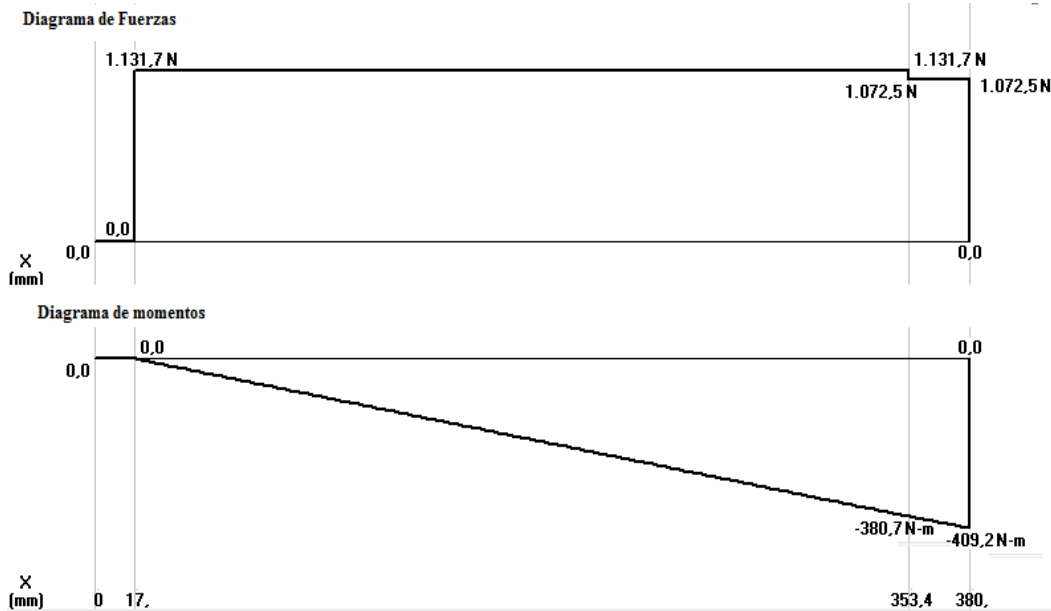


(Mariotti & Ficarra, 2008)



(Elaboración propia, 2018)

Valoración análisis de Elementos Finitos

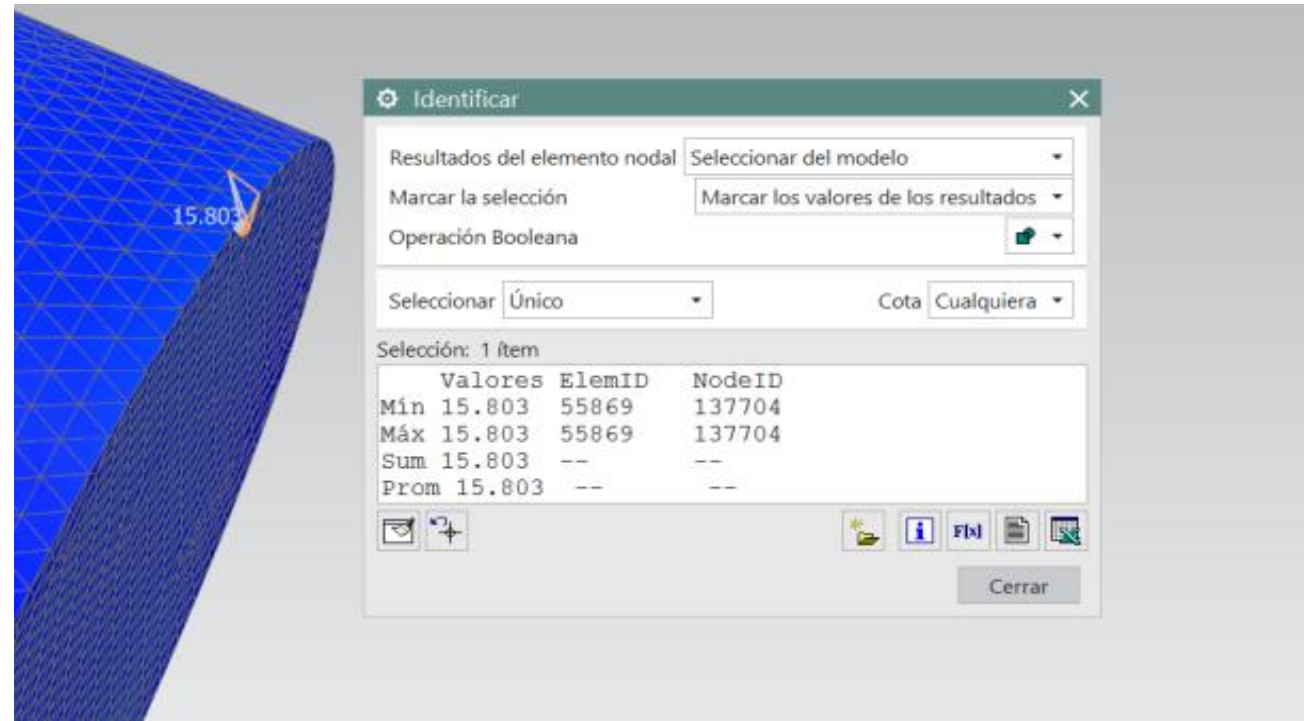


Resultado de Cálculo Von Mises
Tensión efectiva 15.774 MPa

- Diferencia de 0.029 MPa
- Error porcentual (<5%)
analítico / simulación 0.18%

(Febbo, Sergio, Vera, Rossit, 2003)

Resultado de Análisis Von Mises
Tensión efectiva NX 15.803 MPa



COMPARACIÓN DE RESULTADOS MATERIALES

Análisis comparativo resultados ACERO AISI 4340 Aluminio 6061

Intervalo de evaluación	ACERO AISI 4340		Aluminio 6061	
	Desviación máxima [mm]	Esfuerzo elemental máximo [MPa] [N/mm ²]	Desviación máxima [mm]	Esfuerzo elemental máximo [MPa] [N/mm ²]
Incremento 1 - 0.000 segundos	0	0	0	0
Incremento 2 - 1.000 segundos	0.157	58.15	0.440	57.39
Incremento 3 - 2.000 segundos	0.248	92.04	0.697	90.83
Incremento 4 - 3.000 segundos	0.230	85.29	0.645	84.17
Incremento 5 - 4.000 segundos	0.191	70.75	0.535	69.82
Incremento 6 - 5.000 segundos	0.201	74.62	0.565	73.64
Incremento 7 - 6.000 segundos	0.233	86.26	0.652	85.10
Incremento 8 - 7.000 segundos	0.287	106.61	0.807	105.21
Incremento 9 - 8.000 segundos	0.327	121.15	0.917	119.56
Incremento 10 - 9.000 segundos	0.384	142.36	1.077	140.49
Incremento 11 - 10.000 segundos	0.327	121.15	0.917	119.56
Incremento 12 - 11.000 segundos	0.235	87.22	0.660	86.08
Incremento 13 - 12.000 segundos	0.261	96.92	0.733	95.64

Nota: Valores obtenidos mediante análisis dinámico transitorio de respuesta directa SOL109 del programa NX Nastran estructural (Elaboración propia, 2017)

AISI 4340

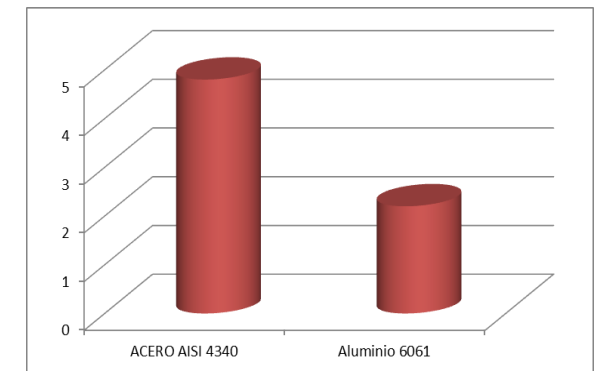
686.70 MPa

Margen de seguridad de 4.8

Aluminio 6061

310 MPa Tratamiento T6

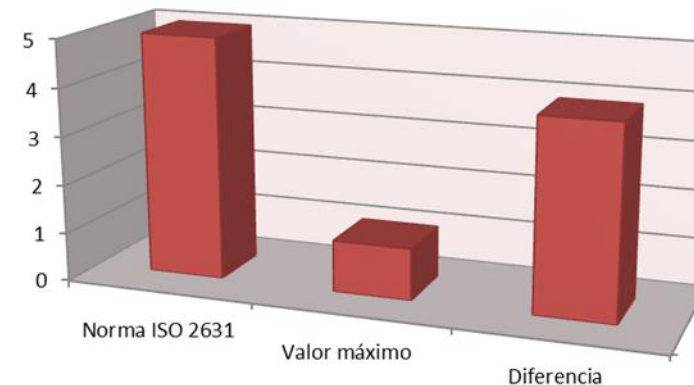
Margen de seguridad de 2.2



CALIDAD DE LA SUSPENSIÓN

Comparación de resultados de evaluación experimental (Promedios)

Frecuencias [Hz]	Suspensión original, altura estándar (T1)	Suspensión original con regulación, altura estándar (T2)	Suspensión original con regulación, altura modificada 1 (T3)	Suspensión alterna con regulación, altura estándar (T4)	Suspensión alterna con regulación, altura modificada 1 (T5)
Valor promedio	1.066	0.65	0.83	0.63	0.89
Frecuencia en el habitáculo máxima	1.066 Hz				
Lineamientos Norma ISO 2631	Menor a 5 Hz				

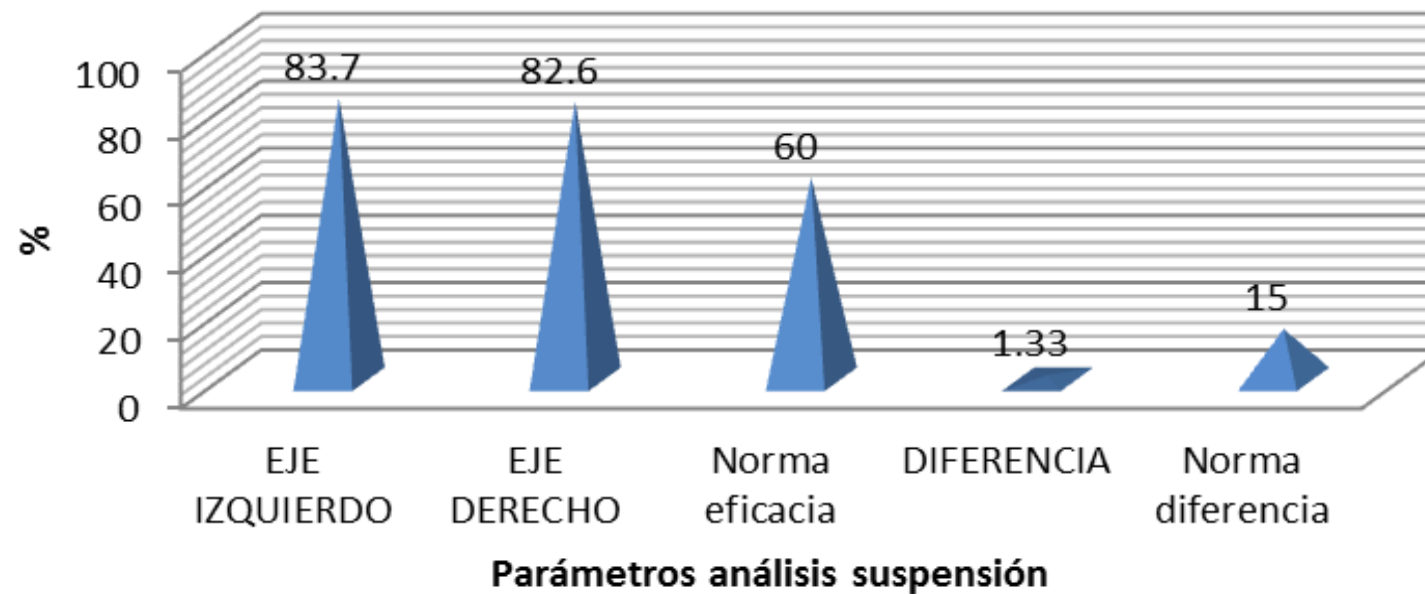


Nota: Detalle de tratamiento experimental de variables con identificación de siglas aplicadas en análisis estadístico para los tratamientos T1, T2, T3, T4 y T5 con respecto a las variaciones experimentales S1, S2, S3, S4, S5 en comparación con la normativa ISO 2631 (Elaboración propia, 2017)

Comparación aceleración combinada

ÍTEM medido	Valor	Normativa	Valor
Frecuencia combinada en el habitáculo	0.26 m/s ² por día	ISO 2631	Máximo 1.15 m/s ² por día

EFICACIA SUSPENSIÓN RTV - MDMQ



Comparación resultados análisis de suspensiones

ÍTEM medido	Valor	Normativa	Valor
Eficacia suspensión izquierda	83.7 %	MDMQ	Mayor a 60 %
Eficacia suspensión derecha	82.6 %	MDMQ	Mayor a 60 %
Desequilibrio Suspensión	1.33 %	MDMQ	Menor a 15 %

Nota: Resultados de análisis comparados con valores máximos y mínimo de acuerdo a normativa MDMQ (Elaboración propia, 2017)

Conclusiones

- Con el desarrollo del presente trabajo de investigación se establece que es posible la construcción del soporte inferior de la suspensión Macpherson, generando un sistema de suspensión ajustable que permite elevar o disminuir la distancia de la carrocería con respecto a la calzada del vehículo Chevrolet Sail cumpliendo los lineamientos de eficacia de suspensión dados por el Distrito Metropolitano de Quito y cumpliendo parámetros de calidad de suspensión de la norma ISO 2631. Siendo el soporte fabricado apto para su funcionamiento en el vehículo.
- El desarrollo de análisis computacional basado en la aplicación de cargas dinámicas en estado transitorio se convierte en un medio efectivo para la valoración y resistencia de la estructura de cualquier componente, es así, que mediante el análisis computacional se logra definir el material más adecuado para el desarrollo del componente, por lo que con los resultados del análisis se obtiene una tensión máxima aplicada en el soporte de 142.49 MPa, comparado con el acero AISI 4340 que soporta una tensión máxima de 686.70 MPa y comparado con aluminio 6061 que tiene una resistencia de 140 MPa al aplicarle un tratamiento térmico T6, se define como el mejor material para la fabricación del soporte el Acero AISI 4340 que no requiere ningún tratamiento térmico por lo que los costos de producción se minimizan y se obtiene un margen de seguridad más alto.

- La determinación de las frecuencias de trabajo mediante el uso de un acelerómetro requiere de la aplicación de métodos numéricos como la transformada rápida de Fourier, que requiere establecer la frecuencia de muestreo mediante la definición del intervalo de cada una de las mediciones, con lo que la evaluación inicial del sensor en conjunto con el banco homologado permite la determinación del tiempo de muestreo de 100 ms para la programación de medición de datos del acelerómetro.
- La evaluación de aceleraciones en el habitáculo del vehículo mediante el tratamiento estadístico demuestra con las réplicas evaluadas con la suspensión ajustable y la suspensión original, demuestra que se logra mejorar la calidad de la suspensión, obteniéndose frecuencias promedio de 1.066 Hz con la suspensión original y valores máximos promedio de frecuencia de 0.89 Hz con la suspensión ajustable registrándose de esta forma una mejora al sistema original del vehículo
- En resumen, el desarrollo de un proceso de diseño y fabricación basado en el uso y determinación de cargas aplicadas en programas como Siemens NX con variación dinámica en estado transitorio permite obtener resultados que garantizan la construcción del dispositivo, es así que el diseño construcción y evaluación del elemento principal de suspensión desarrollado ha generado resultados favorables tanto en su desempeño en funcionamiento como en relación a las prestaciones del sistema regulable en altura.

Recomendaciones

El análisis computacional de cargas dinámicas asistido por computador permite evaluar los cambios de cargas y verificar el comportamiento del material, sin embargo, se recomienda que para garantizar resultados siempre se evalúe la calidad de la malla generada con objeto de garantizar los resultados del análisis.

El soporte que permite el ajuste de altura constituye un elemento que permite modificar el rendimiento y comportamiento de la suspensión por lo que se recomienda evaluar diferentes tipos de resortes y configuraciones de ensamble que permitirá a futuro en el país disponer de información que ayude a diseñar y comercializar sistemas de suspensión de alto rendimiento.

Con respecto a la existencia de materiales y con el prototipo diseñado se recomienda una optimización del diseño basado en un análisis topológico del componente, lo que permitirá reducir el peso final del dispositivo para mejorar la eficiencia de funcionamiento.

Se recomienda el uso de resortes para *coilover* en los componentes de la suspensión ajustable ya que el uso del resorte original requiere de una calibración montaje e instalación más compleja.