



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
SILENCIADOR DE SONIDO VARIABLE PARA
SISTEMAS DE ESCAPE DE MOTORES DE
COMBUSTIÓN INTERNA DE CUATRO TIEMPOS DE
200cc**

AUTORES:

NURY ORTIZ

SEBASTIÁN JÁCOME

DIRECTOR: ING. ALEXANDER IBARRA



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

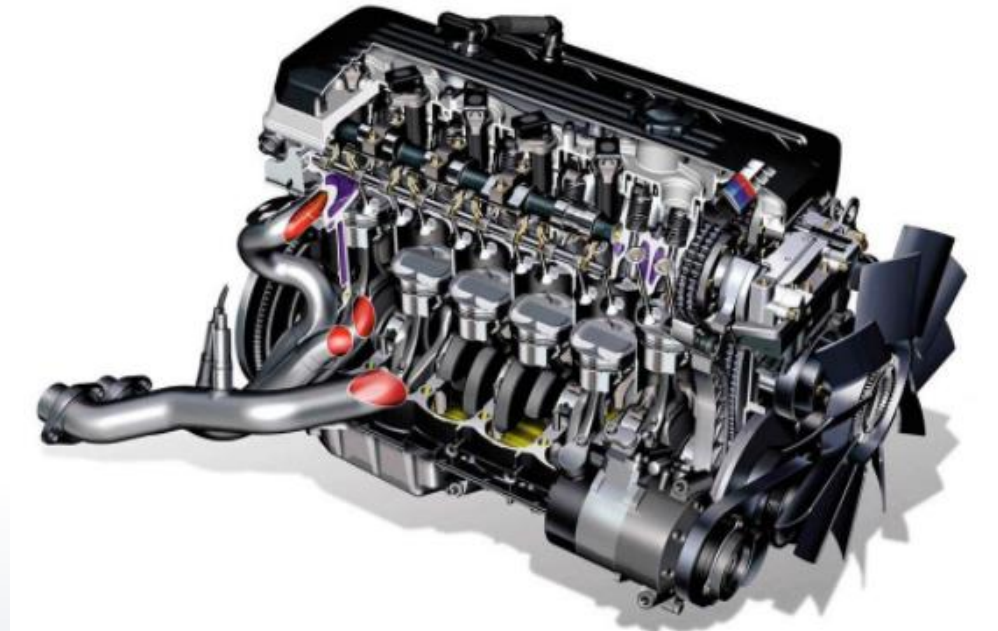
INTRODUCCION



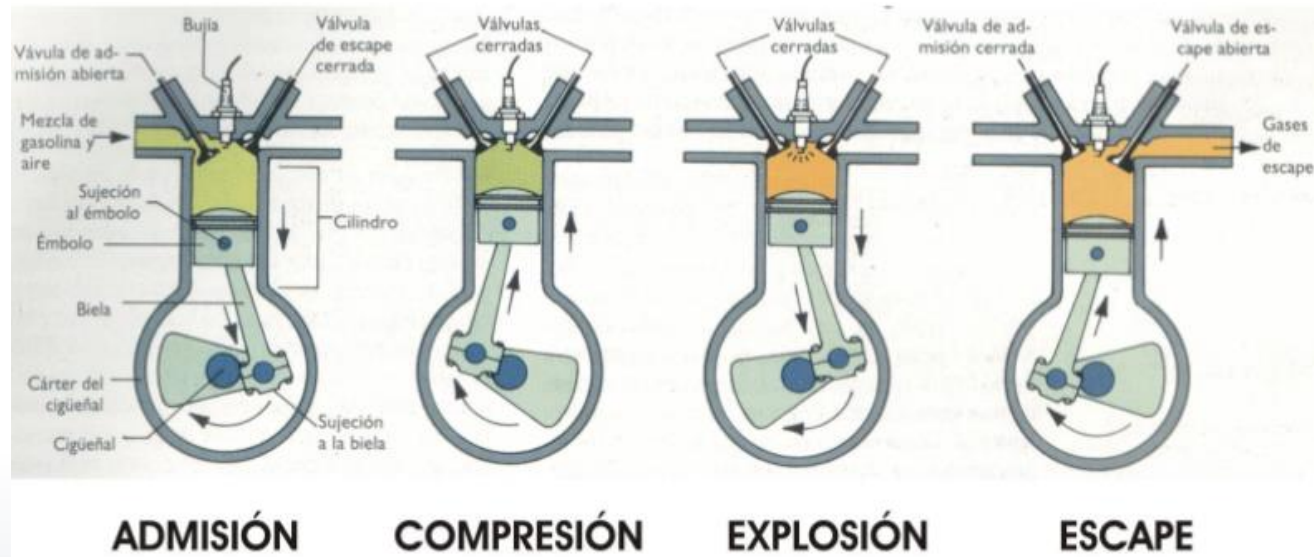
ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

MOTOR DE COMBUSTION INTERNA



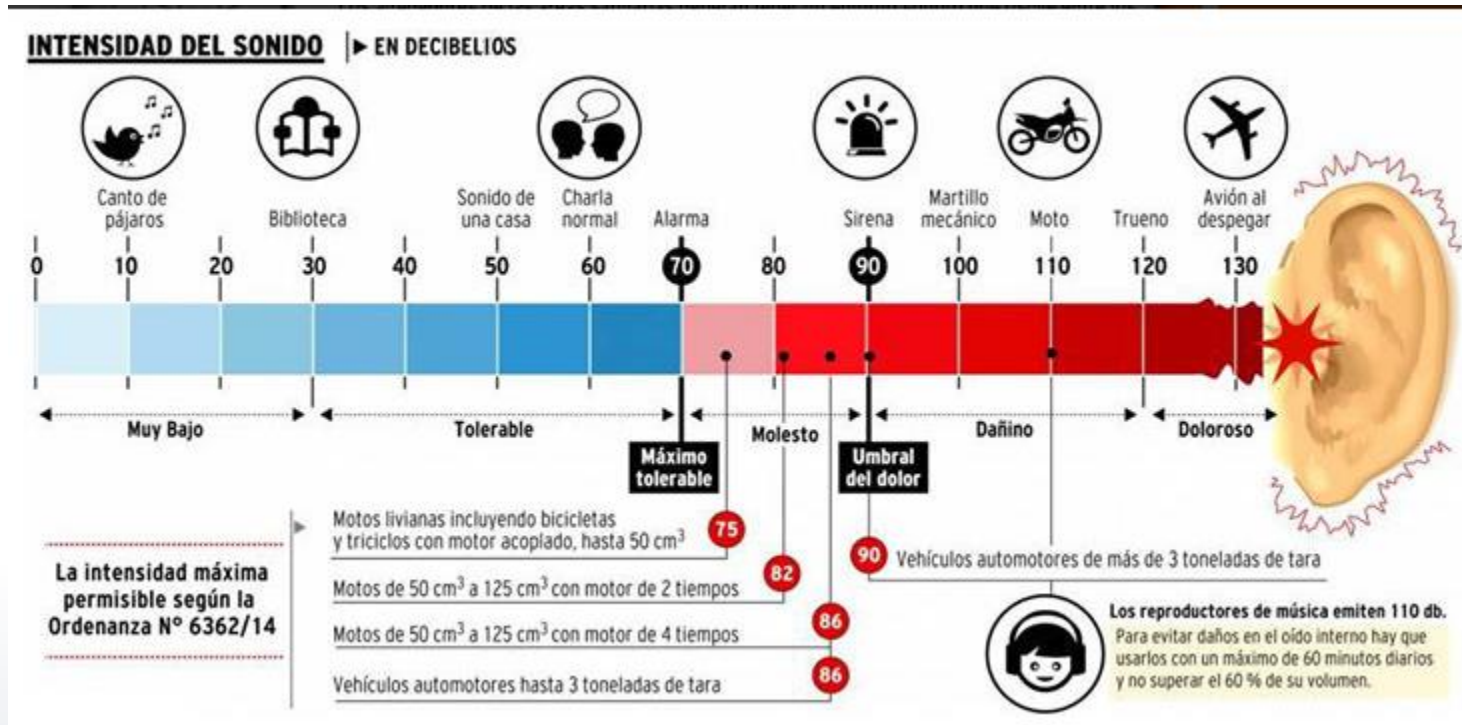
FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE CUATRO TIEMPOS



SISTEMAS DE ESCAPE



INTENSIDAD DE SONIDO



NIVELES DE RUIDO PERMITIDOS

TIPO DE ZONA SEGÚN USO DE SUELO	NIVEL DE PRESIÓN SONORA EQUIVALENTE NPS eq [dB(A)]	
	DE 06H00 A 20H00	DE 20H00 A 06H00
Zona hospitalaria y educativa	45	35
Zona Residencial	50	40
Zona Residencial mixta	55	45
Zona Comercial	60	50
Zona Comercial mixta	65	55
Zona Industrial	70	65





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

NIVELES DE RUIDO PERMITIDOS

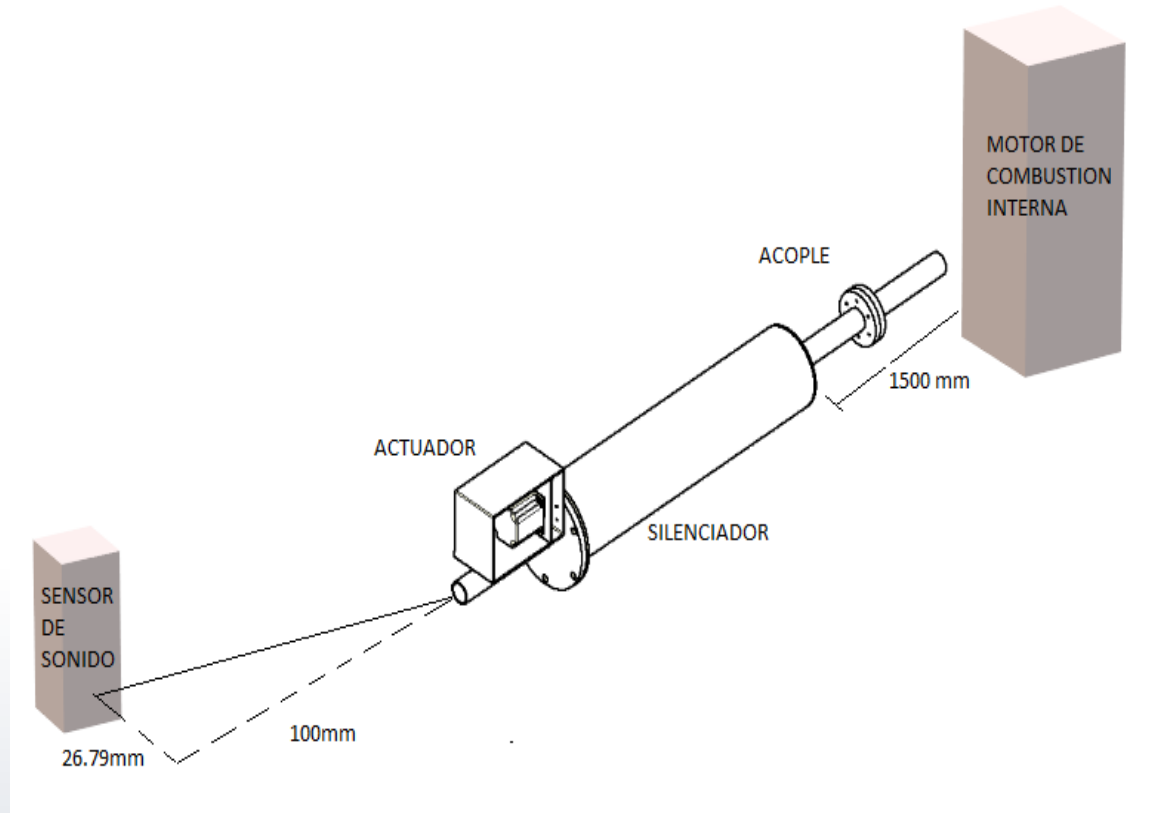
CATEGORÍA DE VEHÍCULO	DESCRIPCIÓN	NPS MAXIMO (dBA)
Motocicletas:	De hasta 200 centímetros cúbicos.	80
	Entre 200 y 500 c. c.	85
	Mayores a 500 c. c.	86
Vehículos:	Transporte de personas, nueve asientos, incluido el conductor.	80
	Transporte de personas, nueve asientos, incluido el conductor, y peso no mayor a 3,5 toneladas.	81
	Transporte de personas, nueve asientos, incluido el conductor, y peso mayor a 3,5 toneladas.	82
	Transporte de personas, nueve asientos, incluido el conductor, peso mayor a 3,5 toneladas, y potencia de motor mayor a 200 HP.	85



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

MEDICION DE RUIDO





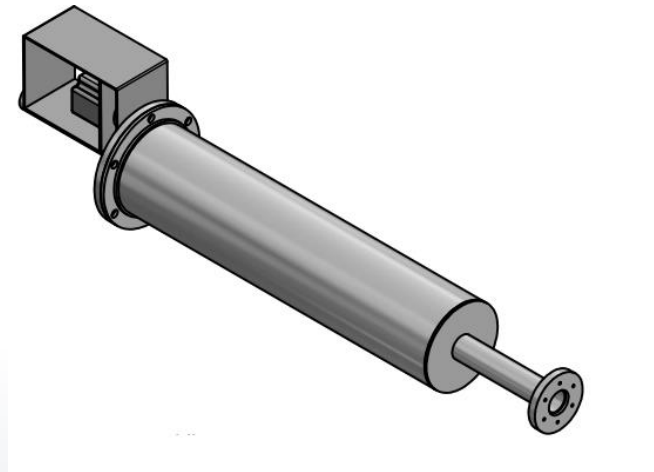
ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir un prototipo de silenciador de sonido variable automatizado para tubos de escape de motores de combustión interna.



OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar la estructura del silenciador para obtener la variación de las emisiones sonoras de los gases de escape de un motor de cuatro tiempos de 200cc.
- Diseñar e implementar un algoritmo de control que permita modificar las variaciones sonoras medidas en decibeles del tubo de escape.
- Diseñar los circuitos de acondicionamiento que cumplan las condiciones necesarias para el correcto funcionamiento de los mecanismos móviles del silenciador.



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DISEÑO
DISEÑO



MOTOR

Marca	Villiers F. 15
Motor	4 tiempos
Carrera	44mm
Diámetro	65mm
Relación de compresión	8.5 : 1



DATOS OBTENIDOS DEL BANCO DE PRUEBAS

Carga	Fuerza	Tiempo	RPM	Torque	Potencia al Freno	Consumo másico de combustible	Decibeles
	[N]	[s]	[rpm]	[N.mm]	[W]	[cc/s]	[dB]
0	10,7	76	3567,63	2835,50	1059,35	246,71	112,64
2	11,8	81,3	3503,32	3127,00	1147,20	230,63	111,20
2	13,5	89,6	2988,62	3577,50	1119,64	209,26	106,10
3	11,7	90,5	3015,25	3100,50	979,00	207,18	104,10
2	14,9	107,8	2503,53	3948,50	1035,17	173,93	99,30
3	17,5	111,2	2498,20	4637,50	1213,22	168,62	97,10
2	15,3	138,6	2013,85	4054,50	855,06	135,28	93,90
3	17,11	140,5	2038,72	4534,15	968,02	133,45	93,60
4	16,7	137,5	1994,18	4425,50	924,18	136,36	93,10
3	16,1	214,8	1479,89	4266,50	661,20	87,29	82,60

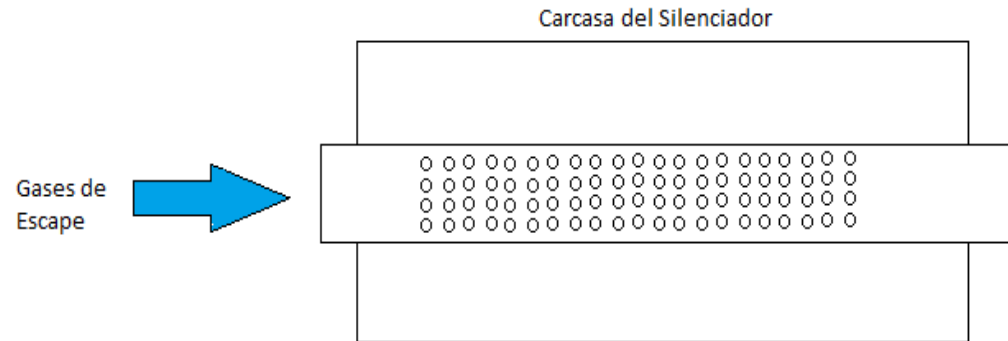
PARÁMETROS DE DISEÑO

Parámetros de diseño	
Rango de decibeles	20 dB
Tamaño máximo	0,5 m
Distancia mínima para colocar el silenciador	1,5 m

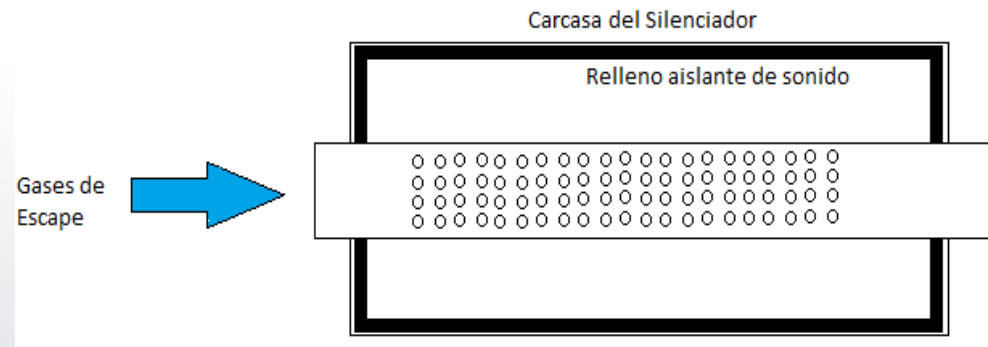


TIPOS DE SILENCIADORES

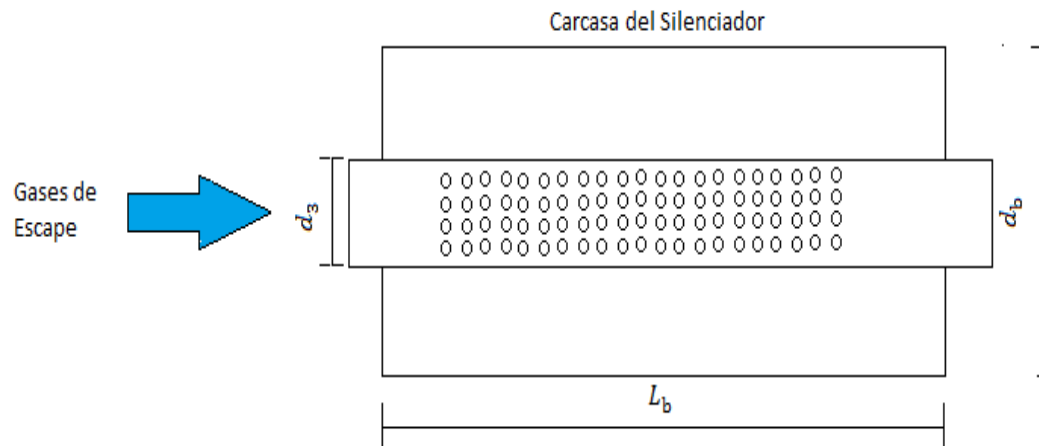
SILENCIADOR DE LADO RESONANTE



SILENCIADOR DE ABSORCIÓN



CÁLCULOS



d_3 que corresponde al diámetro de la tubería de escape,

L_b que corresponde a la longitud del silenciador,

d_b que corresponde al diámetro del silenciador.

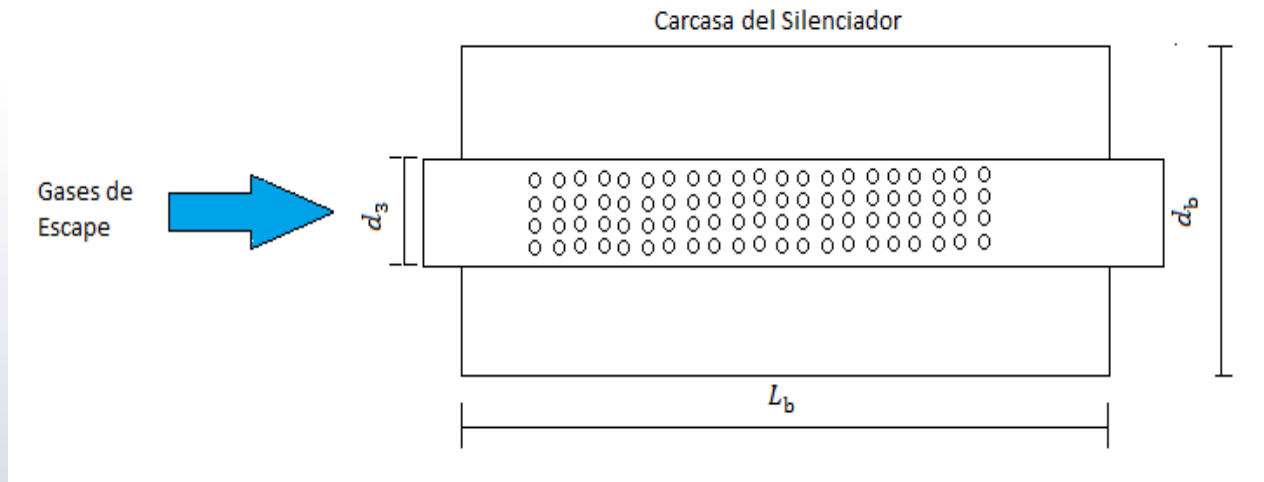
CÁLCULOS

$$a_0 = \sqrt{\gamma R T_o} = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0}}$$

$$a_0 = 520.84 \frac{m}{s} = 20505.9 \frac{in}{s}$$

$$f_{sr} = \frac{a_0}{2\pi} \times \sqrt{\frac{K_h}{V_b}}$$

$$\frac{K_h}{V_b} = 0.3755$$





CÁLCULOS

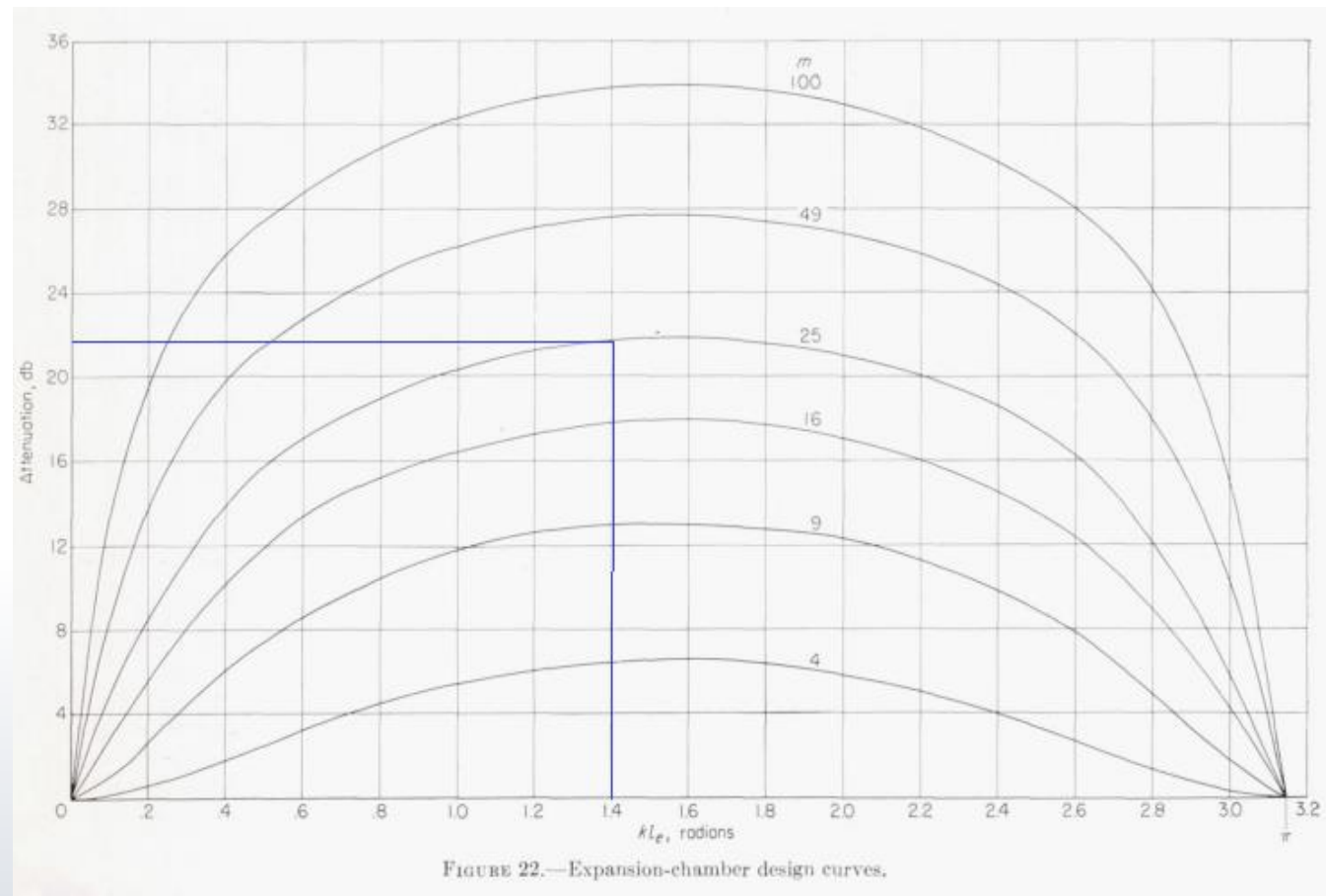


FIGURE 22.—Expansion-chamber design curves.



CÁLCULOS

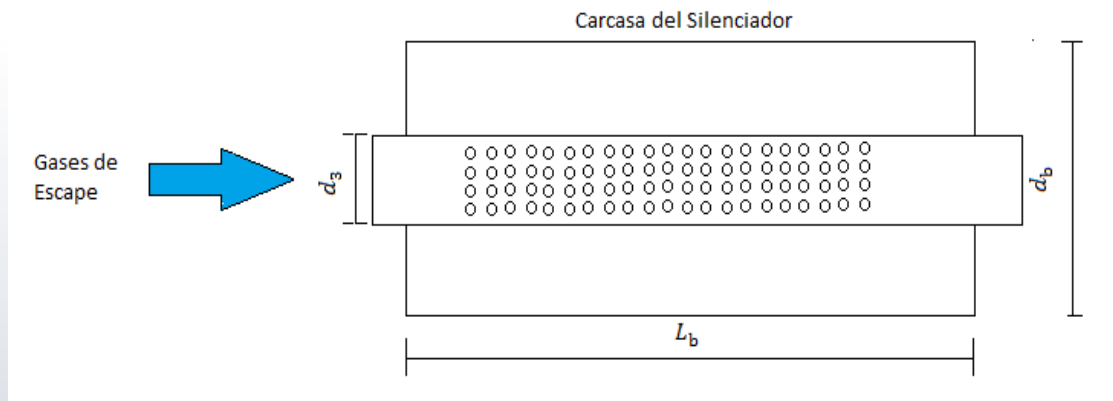
$$kle = \frac{2\pi * L_b * f}{a_0}$$

$$d_3 = 1 \frac{1}{4} in$$

$$d_b = d_3 \sqrt[2]{m}$$

$$L_b = 18.24 in$$

$$d_b = 5 \frac{1}{4} in$$







ESPE


UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DISEÑO ELECTRÓNICO




SELECCIÓN DEL MOTOR

Imagen	Motor a Pasos	Servomotor
		
Nombre Comercial	Bipolar Nema 17	DY-S0213MG 13 KG
Torque	2,8 N.cm	13 Kg.cm
Amperaje	3 amperios	1,5 amperios
Voltaje	12 V	4,8 V - 7,2 V
Disponibilidad	Inmediata	Uno a dos meses
Costo	15	25,5

SELECCIÓN DEL DRIVER

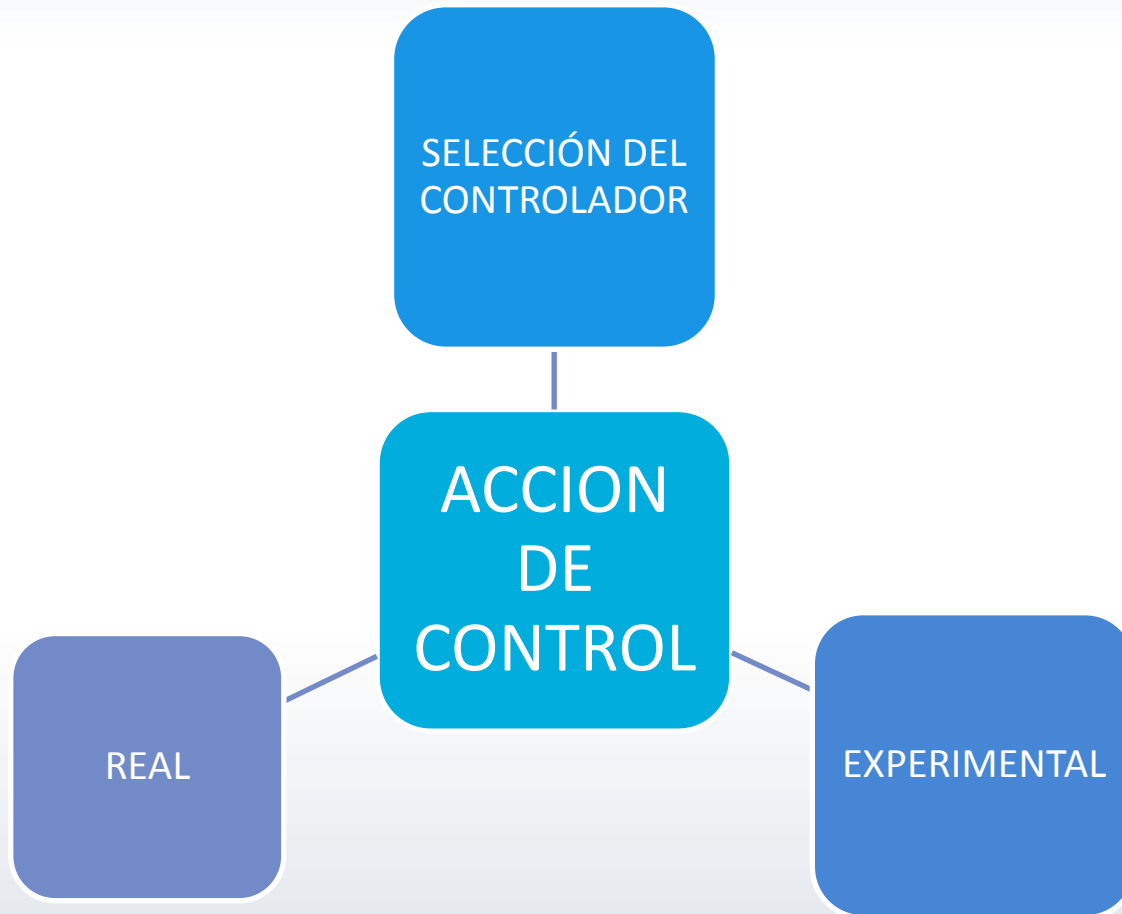
Driver	
	
Corriente pico de operación	4 amperios
Corriente de operación constante	3 amperios
Voltaje de motor	12 - 24 V
Voltaje de activación	5 V
Costo	20

SELECCIÓN DEL SENSOR

Sensor de sonido	KY-038	LM324	JTS1357
Imagen			
Tipo de sensor	Analógico y digital	Analógico	Analógico
V de salida	0 - 5 V	0-5	0- 1,3V
Voltaje de entrada	0 - 6 V	0-24 V	6V
Costo	5	4,5	95
Temperatura	15 - 100 °C	15- 60 °C	8-125 °C

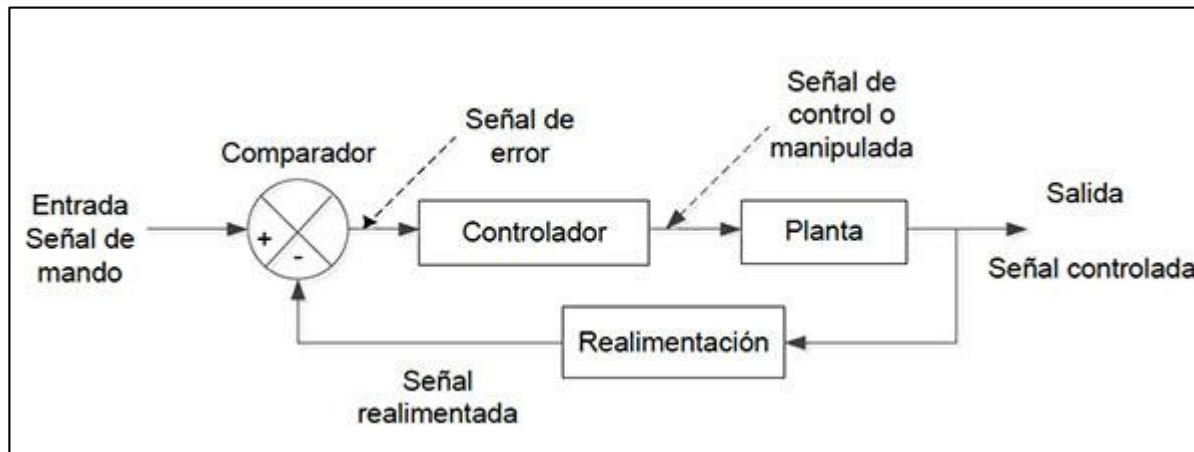


DISEÑO DE CONTROL

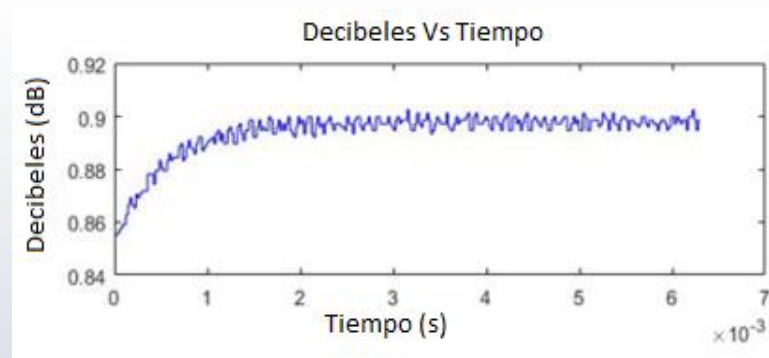




CONTROL EXPERIMENTAL



METODO CLASICO ZIEGER - NICOLS



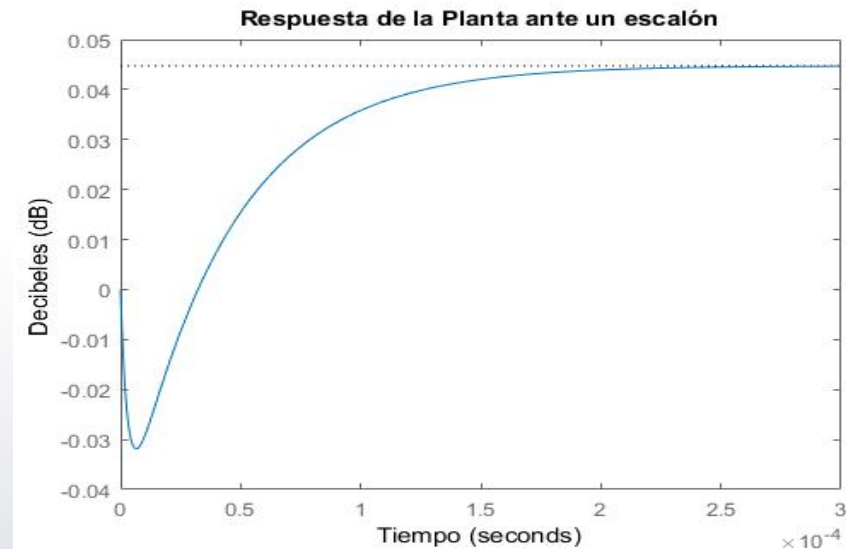


ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA

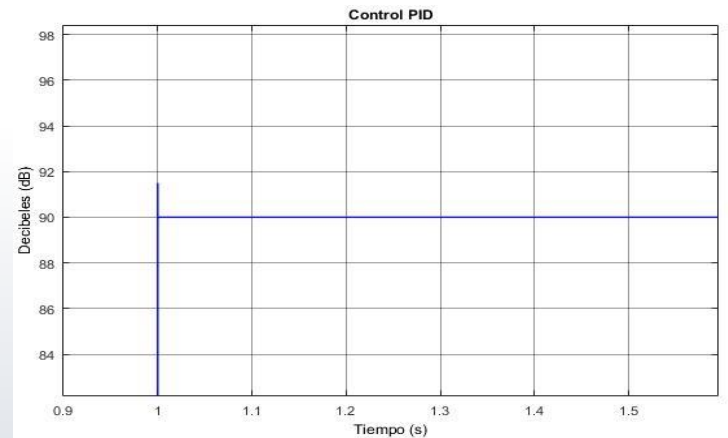
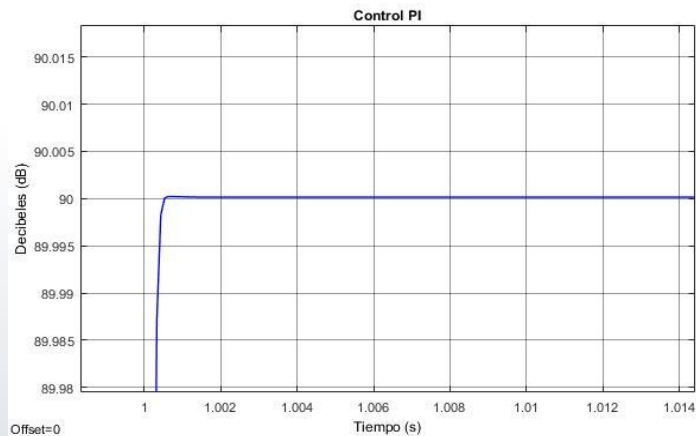
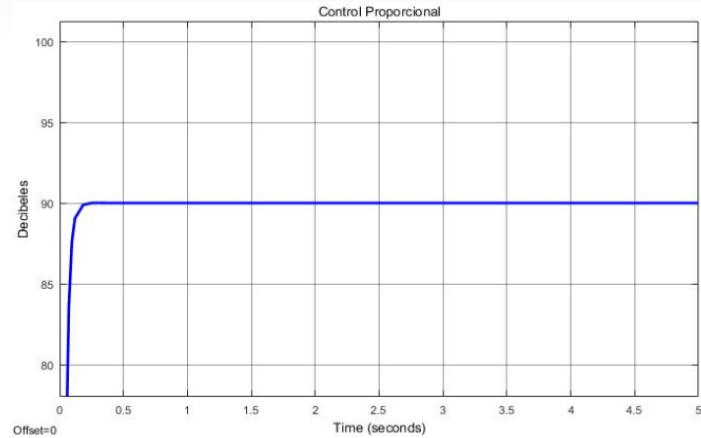
$$G_{\text{planta}}(s) = \frac{-0.04474 s + 1065}{3.004e^{-6} s^2 + 1.072 s + 2.381e^4}$$



PARAMETROS DE CONTROL

Parámetros de rendimiento

Parámetro	Valor
M_p	5%
T_{ss}	Menor que 3s
E_{ss}	2dB





SELECCIÓN DE CONTROL

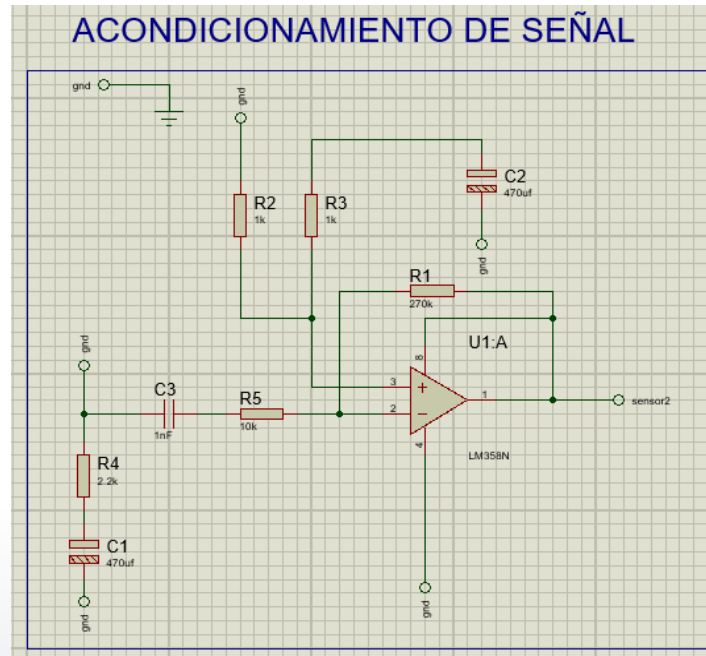
Selección de controlador

	Control Clásico	Control Moderno
Característica	Este tipo de control puede implementarse en sistemas en los cuales la oscilación propia del controlador no afecta al elemento de control final	Tienen grandes ventajas de control ante un control clásico por tener mejor tiempo de respuesta y ser más robustos. Ocupan más recursos de control
Implementación	Aplicable a sistemas de poca exactitud	Recomendado para sistemas de alta exactitud
Actuador	Apto para el control en un motor a pasos	No apto para un motor a pasos por la operatividad propia de dicho motor

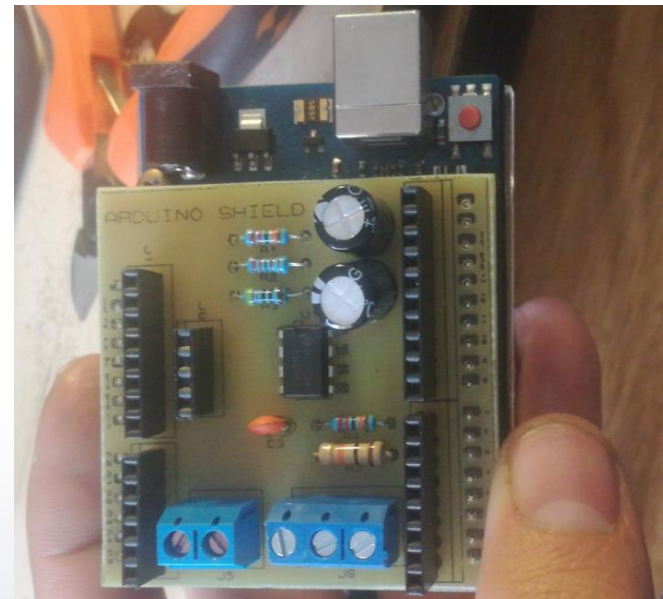
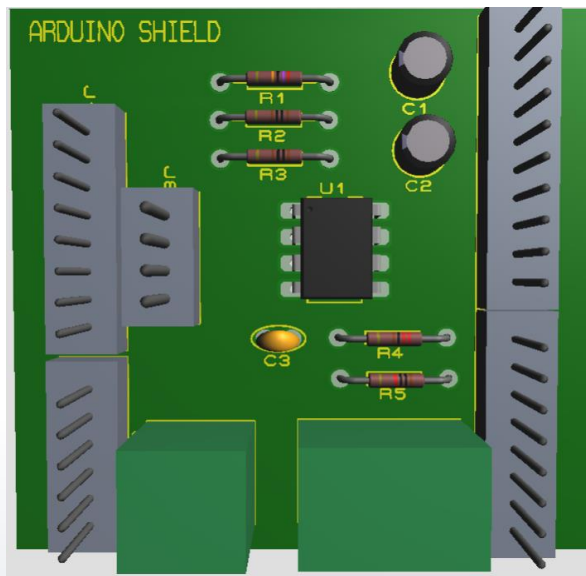
Fuente: (Ogata, 2010) (Ibarra, Subsistema Sensorial, 2016)



ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

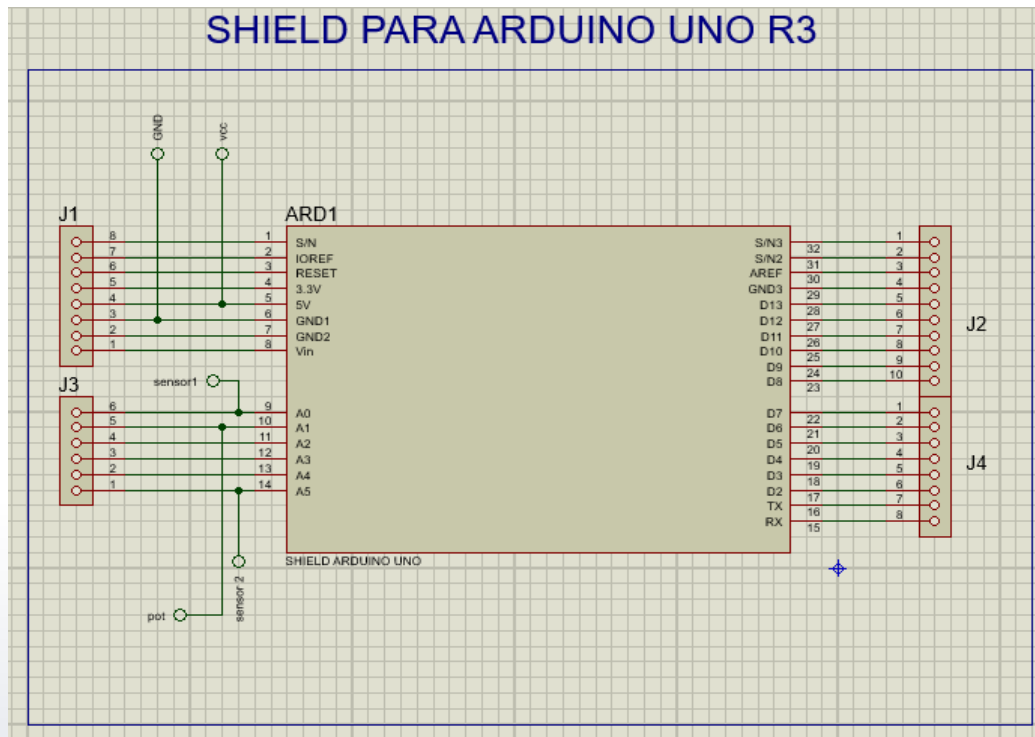


SHIELD DE ARDUINO

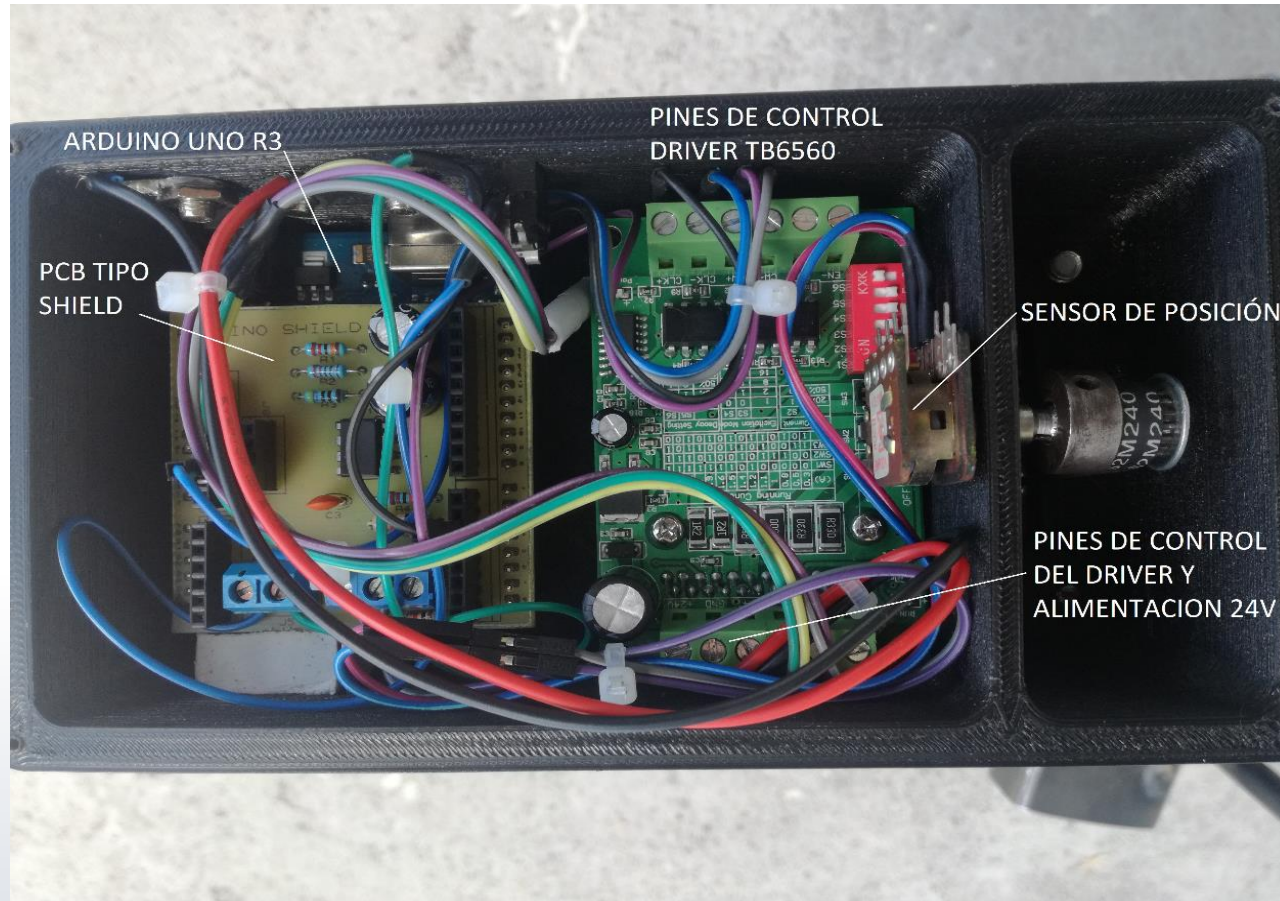




SHIELD DE ARDUINO



IMPLEMENTACIÓN ELECTRÓNICA





COMPARACIÓN DE CONTROLADOR REAL VS SIMULADO





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

HMI

HMI MODO EXPERIMENTAL

Control de un silenciador variable

Experimental Real Totalmente Abierto En posicion Totalmente Cerrado

Decibeles Actuales



Experimental Real Revoluciones Decibeles



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



ESPE
INGENIERÍA
MECATRÓNICA

HMI MODO REAL

Control de un silenciador variable

Experimental Real Alto Medio Bajo

Decibeles Actuales 0



Experimental

Real Nivel de Sonido Alto

STOP



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



CONSTRUCCIÓN

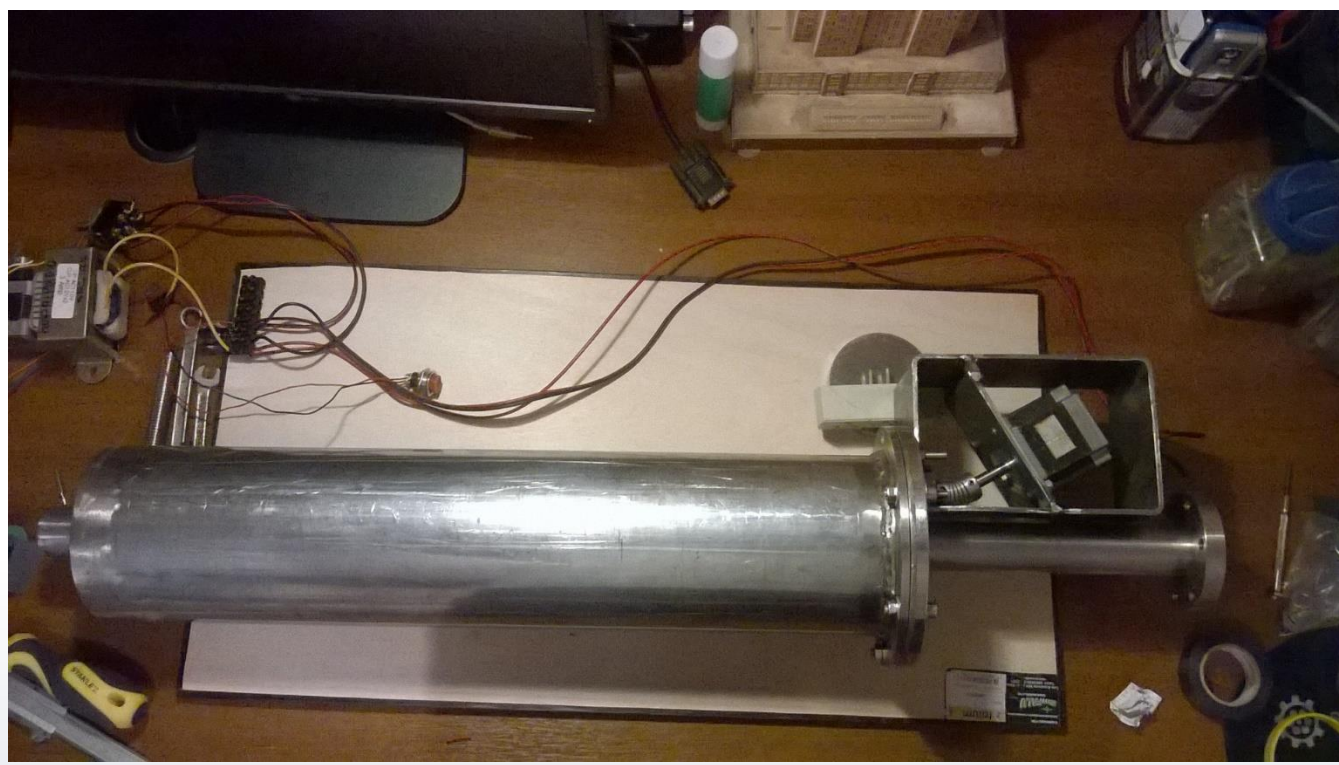


BRIDAS Y ELEMENTOS MECANICOS



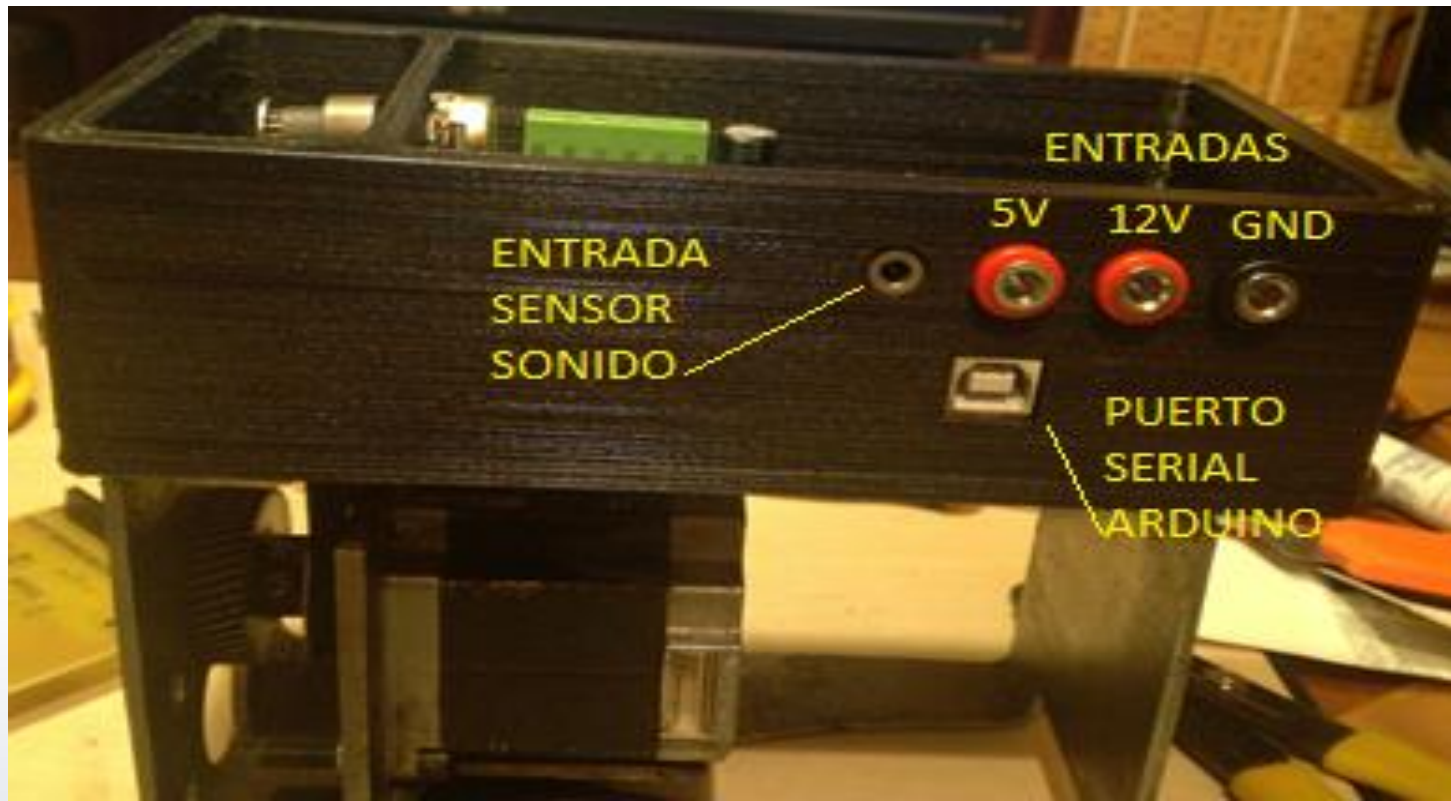


SILENCIADOR

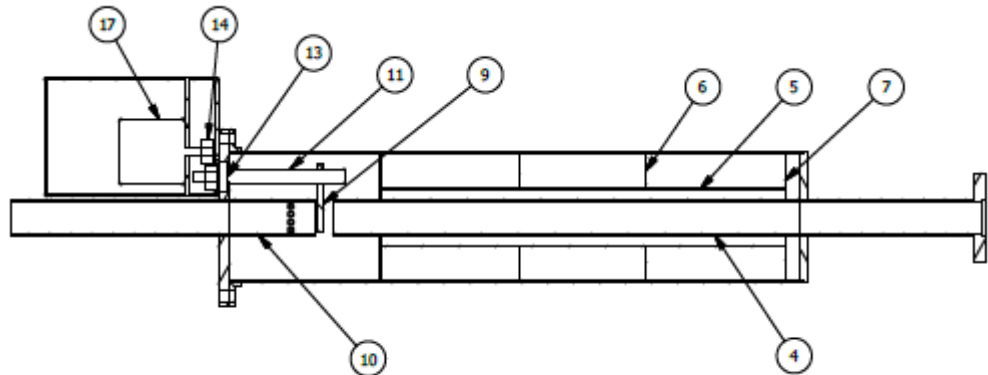




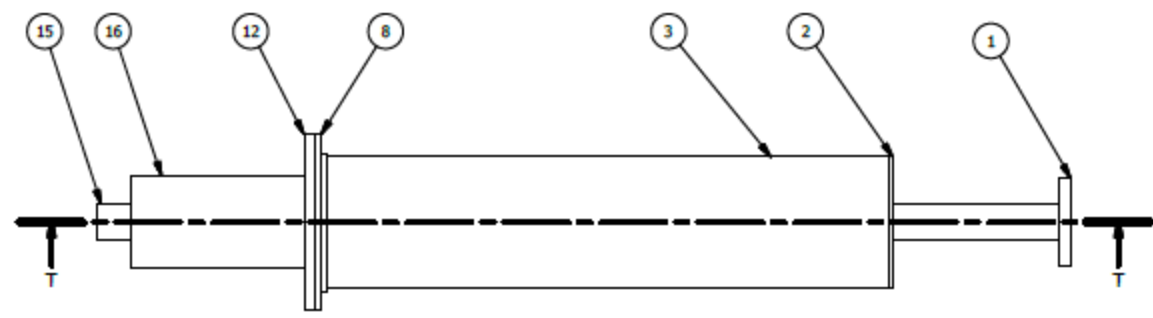
ACTUADOR Y COMPONENTES DE CONTROL

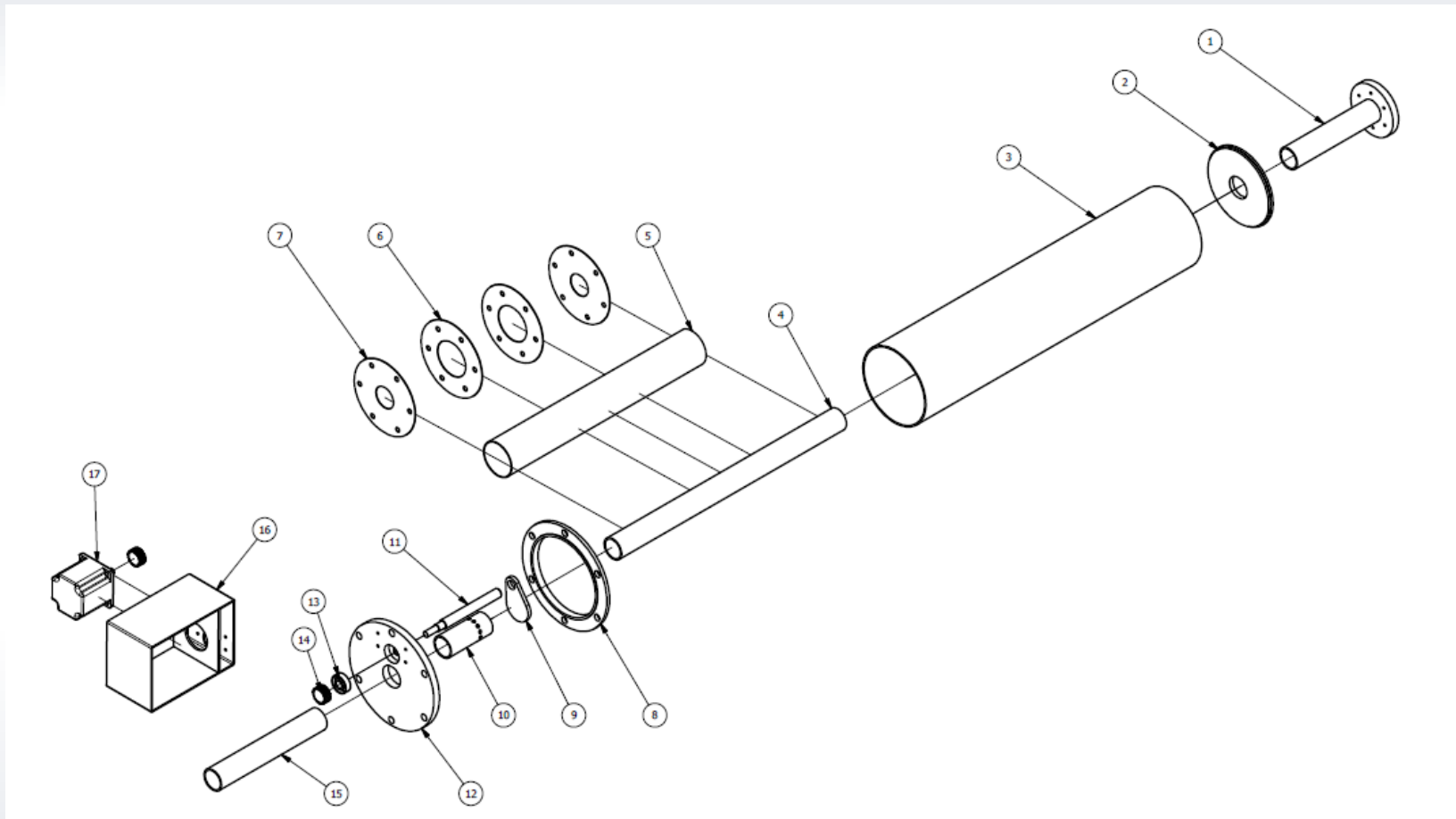


FUNCIONAMIENTO



SECCIÓN T-T







IMPLEMENTACIÓN





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

PRUEBAS Y RESULTADOS



SIN SILENCIADOR

Carga	Fuerza	Tiempo	RPM	Torque	Potencia al Freno	Consumo másico de combustible	Decibeles
	[N]	[s]	[rpm]	[N.mm]	[W]	[cc/s]	[dB]
0	10,7	76	3567,63	2835,50	1059,35	246,71	112,64
2	11,8	81,3	3503,32	3127,00	1147,20	230,63	111,20
2	13,5	89,6	2988,62	3577,50	1119,64	209,26	106,10
3	11,7	90,5	3015,25	3100,50	979,00	207,18	104,10
2	14,9	107,8	2503,53	3948,50	1035,17	173,93	99,30
3	17,5	111,2	2498,20	4637,50	1213,22	168,62	97,10
2	15,3	138,6	2013,85	4054,50	855,06	135,28	93,90
3	17,11	140,5	2038,72	4534,15	968,02	133,45	93,60
4	16,7	137,5	1994,18	4425,50	924,18	136,36	93,10
3	16,1	214,8	1479,89	4266,50	661,20	87,29	82,60
4	16,4	200,9	1524,64	4346,00	693,88	93,33	82,20



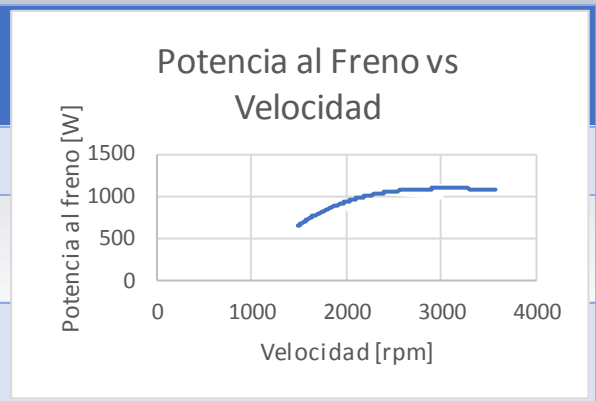
SILENCIADOR MODO ABIERTO

Carga	Fuerza	Tiempo	RPM	Torque	Potencia al Freno	Consumo máximo de combustible	Decibeles
	[N]	[s]	[rpm]	[N.mm]	[W]	[cc/s]	[dB]
0	10	52,9	4620,79	2650	1282,31	354,44	100,6
2	15,2	54,7	4002,56	4028	1688,33	342,78	99,9
0	16,4	53,2	3983,46	4346	1812,92	352,44	99,7
3	10,9	59,6	3510,40	2888,5	1061,84	314,60	92,5
2	10,2	60	3506,00	2703	992,40	312,50	93,3
3	14,1	71,4	3026,05	3736,5	1184,05	262,61	88,1
3	15,9	80	2538,75	4213,5	1120,19	234,38	80,2
4	16,1	101,8	2071,71	4266,5	925,61	184,18	78,3
3	16,3	105,3	2023,93	4319,5	915,50	178,06	77,9
4	15,9	158,5	1496,40	4213,5	660,27	118,30	75,3
4	12,7	252,4	1003,65	3365,5	353,72	74,29	70,8

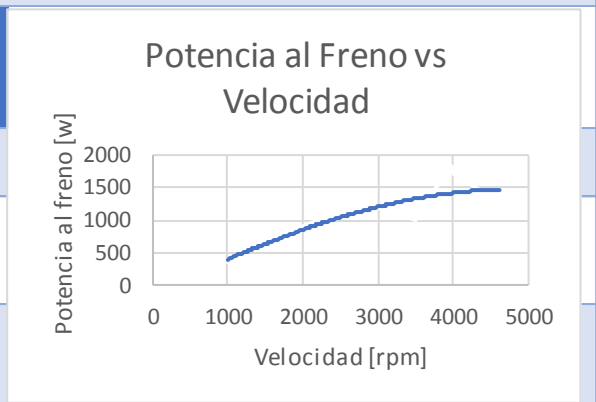
SILENCIADOR MODO CERRADO

Carga	Fuerza	Tiempo	RPM	Torque	Potencia al Freno	Consumo másico de combustible	Decibeles
	[N]	[s]	[rpm]	[N.mm]	[W]	[cc/s]	[dB]
0	9,6	51,9	4070,52	2544	1084,42	361,27	81,1
2	9,5	54,4	4047,79	2517,5	1067,13	344,67	81,1
3	9,8	55	3945,82	2597	1073,10	340,91	80,5
2	10,6	59,8	3522,74	2809	1036,24	313,55	77,4
3	10,8	58,9	3505,26	2862	1050,56	318,34	76,3
4	11,1	60,7	3523,89	2941,5	1085,48	308,90	77,4
3	14,1	69,6	2990,52	3736,5	1170,15	269,40	74,9
4	14,3	70,5	3005,11	3789,5	1192,54	265,96	75,4
3	15,7	82,1	2468,70	4160,5	1075,58	228,38	73,1
4	15,7	85,5	2501,05	4160,5	1089,68	219,30	71,7
3	16,5	113,2	1927,74	4372,5	882,69	165,64	70,6
4	16,3	109,3	1958,65	4319,5	885,97	171,55	70,5
4	15,5	163,5	1482,57	4107,5	637,71	114,68	68,4
4	17,3	260,3	1041,41	4584,5	499,97	72,03	64,8

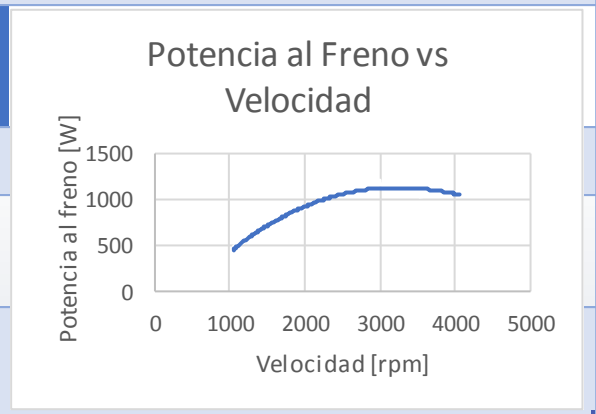
Sin Silenciador	Potencia al freno	Revoluciones
	[W]	[rpm]
Potencia al freno máximo	1059,35	3500
Potencia al freno mínima	661,19	1500



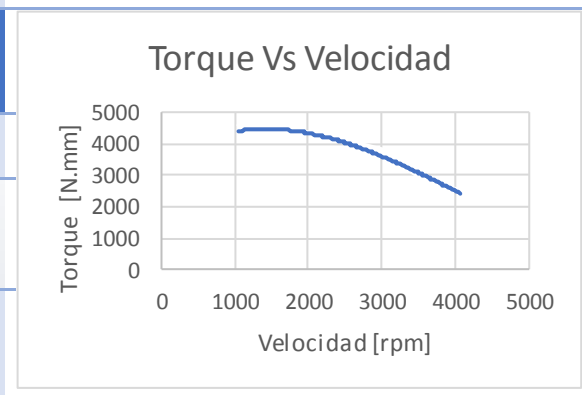
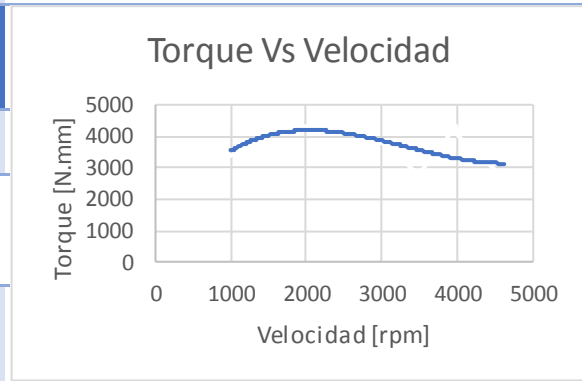
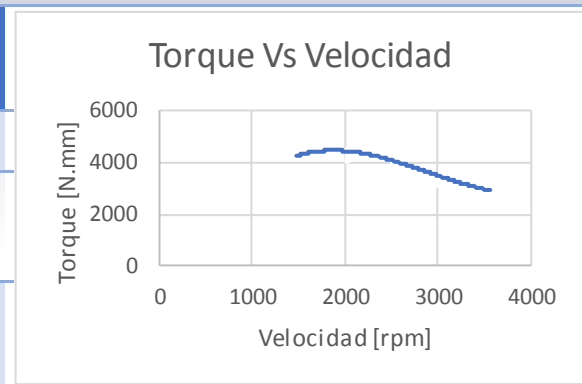
Con Silenciador en ciclo abierto	Potencia al freno	Revoluciones
	[W]	[rpm]
Potencia al freno máximo	1282,31	4500
Potencia al freno mínima	353,7	1000



Con silenciador en ciclo cerrado	Potencia al freno	Revoluciones
	[W]	[rpm]
Potencia al freno máximo	1192,54	3500
Potencia al freno mínima	449,97	1000



Sin Silenciador	Torque	Revoluciones
	[N.mm]	[rpm]
Torque máximo	4533,4	2000
Torque mínimo	2835,5	3500
Con Silenciador en ciclo abierto	Torque	Revoluciones
	[N.mm]	[rpm]
Torque máximo	4319,5	2000
Torque mínimo	2650	4000
Con silenciador en ciclo cerrado	Torque	Revoluciones
	[N.mm]	[rpm]
Torque máximo	4584,5	1500
Torque mínimo	2544	4000



Sin Silenciador	Consumo másico de combustible	Revoluciones
-----------------	-------------------------------	--------------

[cc/s] [rpm]

Consumo másico de combustible	246,71	3500
-------------------------------	--------	------

Consumo másico de combustible	87,29	1500
-------------------------------	-------	------

Con Silenciador en ciclo abierto	Consumo másico de combustible	Revoluciones
----------------------------------	-------------------------------	--------------

[cc/s] [rpm]

Consumo másico de combustible	354,44	4500
-------------------------------	--------	------

Consumo másico de combustible	74,28	1000
-------------------------------	-------	------

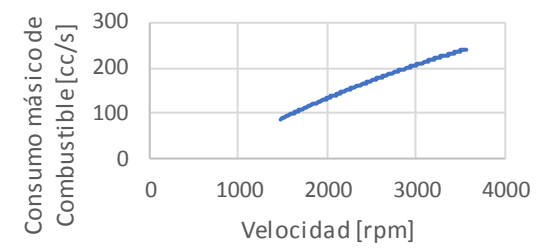
Con silenciador en ciclo cerrado	Consumo másico de combustible	Revoluciones
----------------------------------	-------------------------------	--------------

[cc/s] [rpm]

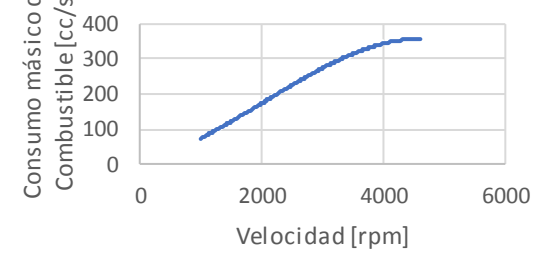
Consumo másico de combustible	361,3	4000
-------------------------------	-------	------

Consumo másico de combustible	72,03	1000
-------------------------------	-------	------

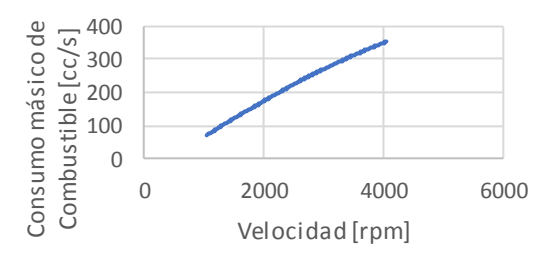
Consumo másico de combustible Vs Velocidad



Consumo másico de combustible Vs Velocidad



Consumo másico de combustible Vs Velocidad





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CONCLUSIONES



CONCLUSIONES

- La estructura diseñada para el silenciador de tubo de escape de sonido variable para un motor de cuatro tiempos de 200cc construido, es capaz de variar hasta 20 dB a 4500 rpm (altas revoluciones) y hasta 6dB a 2000 rpm (bajas revoluciones).
- Se implementó un algoritmo de control para el funcionamiento experimental el mismo que controla los decibeles de salida de acuerdo a las lecturas del sensor utilizando el método de control clásico todo o nada de banda muerta, estabilizándose a los 10 segundos de ingresado el set point.
- Para el acondicionamiento de la señal del sensor de sonido se utilizó un amplificador operacional LM385 el mismo que permite tener una ganancia de fase de 100dB.



CONCLUSIONES

- La diferencia entre las pruebas realizadas en campo y el modelo matemático de la planta es notable ya que en campo la planta se estabiliza en 10 segundos y el modelo matemático presenta una estabilización en 3milisegundos, esto se debe a que la tarjeta de adquisición de datos y la comunicación con la HMI es de 9600 Hz.
- En los resultados se demostró que la planta se estabiliza en 2 milisegundos en lazo abierto por lo que es necesario tener una tarjeta de adquisición de datos de mínimo 48Ks/s para realizar el modelamiento matemático de la planta.
- Al realizar las pruebas mecánicas se obtuvo que el motor consume un 43% más de combustible solamente colocando el silenciador lo que disminuye la eficiencia del mismo.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

RECOMENDACIONES



RECOMENDACIONES

- Se recomienda la implementación de pulsadores en lugar de una HMI para la implementación en un automotor ya que el control del mismo puede ocasionar distracciones y por ende accidentes de tránsito.
- Para futuros proyectos se recomienda también realizar el control del motor de 4 tiempos ya que esto haría que los dos sistemas tanto de del silenciador como el del motor se sincronicen y se muevan acorde a los decibeles seleccionados.