

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN
SISTEMA DE CONTROL SEMIACTIVO DE VIBRACIONES
USANDO FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS PARA EL
LABORATORIO DE MECANISMOS Y SERVOMEKANISMOS
DEL DECEM**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECATRÓNICO**

**LUIS SANTIAGO LEMA PAUCAR
MAYRA ALEJANDRA REYES CASTILLO**

**DIRECTOR: ING. NICOLÁS PÁEZ
CODIRECTOR: ING. FERNANDO OLMEDO**

Sangolquí, 2013-09

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL SEMIACTIVO DE VIBRACIONES USANDO FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS PARA EL LABORATORIO DE MECANISMOS Y SERVOMEKANISMOS DEL DECEM” fue realizado en su totalidad por Luis Santiago Lema Paucar y Mayra Alejandra Reyes Castillo, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecatrónico.

Ing. Nicolás Páez
DIRECTOR

Ing. Fernando Olmedo
CODIRECTOR

Sangolquí, 13-09-17

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL SEMIACTIVO DE VIBRACIONES USANDO FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS PARA EL LABORATORIO DE MECANISMOS Y SERVOMEKANISMOS DEL DECEM”

ELABORADO POR:

Luis Santiago Lema Paucar

Mayra Alejandra Reyes Castillo

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

Ingeniero Luis Echeverría

DIRECTOR DE CARRERA

Sangolquí, 13-09-23

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Mayra Alejandra Reyes Castillo y Luis Santiago Lema Paucar

Autorizamos a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado: **“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL SEMIACTIVO DE VIBRACIONES USANDO FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS PARA EL LABORATORIO DE MECANISMOS Y SERVOMEKANISMOS DEL DECEM”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y auditoría.

Mayra Alejandra Reyes Castillo

Luis Santiago Lema Paucar

Sangolquí, 13-09-23

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a nuestros padres y hermanos, por el apoyo fundamental que nos han brindado, a nuestros amigos que estuvieron apoyándonos y preocupándose por nosotros, y de manera muy especial a nuestro Dios, que gracias a Él, hemos logrado culminar esta etapa de nuestra vida.

Santiago L.

Mayra R.

AGRADECIMIENTOS

Queremos darle las gracias a Dios, por darnos la vida, por ayudarnos y fortalecernos en cada momento y porque nos ha permitido alcanzar esta sueño. Agradecemos a nuestros padres, por habernos apoyado en cada etapa de nuestra vida estudiantil, brindándonos de ánimo, comprensión y confianza.

Un agradecimiento también a nuestro Director el Ing. Nicolás Páez y Codirector el Ing. Fernando Olmedo por guiarnos a través de este camino. Finalmente un agradecimiento al Ing. León Mera encargado del Laboratorio de Química 1 de la Escuela Politécnica Nacional, que nos permitieron utilizar sus instalaciones.

Santiago L.

Mayra R.

“Todo lo puedo en Cristo que me fortalece”

Filipense 4:13

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	I
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	II
AUTORIZACIÓN	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
TABLAS	XII
FIGURAS	XIII
RESUMEN	XIX
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	3
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.3.1 GENERAL	5
1.3.2 ESPECÍFICOS	5

1.4	ALCANCE DEL PROYECTO	6
CAPÍTULO 2		8
MARCO TEÓRICO.....		8
2.1	PRINCIPIO DE VISCOSIDAD	8
2.2	TIPOS DE FLUIDOS	10
2.2.1	FLUIDOS NEWTONIANOS	10
2.2.2	FLUIDOS NO NEWTONIANOS	11
2.2.2.1	Fluidos independientes del tiempo.....	11
2.2.2.2	Fluidos dependientes del tiempo de aplicación.....	14
2.2.2.3	Fluidos Viscoelásticos.....	16
2.3	MATERIALES INTELIGENTES.....	17
2.4	FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS	20
2.4.1	DEFINICIÓN	20
2.4.2	COMPOSICIÓN.....	21
2.4.3	ÁREAS DE APLICACIÓN.....	22
2.5	SENSORES Y ACTUADORES.....	22
2.5.1	SENSOR DE VIBRACIÓN	22
2.5.2	SENSOR DE TENSIÓN.....	25
2.5.3	SENSORES DE CORRIENTE	26
2.5.3.1	Resistencia shunt	26
2.5.3.2	Sensor de efecto Hall.....	26
2.5.4	MOTORES ELÉCTRICOS.....	27
2.6	SISTEMAS VIBRATORIOS.....	30

2.6.1	TIPOS DE VIBRACIONES.....	30
2.6.2	CONSTRUCCIÓN DE MODELOS.....	30
2.6.3	RESONANCIA	31
2.6.4	SISTEMAS DE 1 GDL	31
2.6.5	RESPUESTA LIBRE.....	32
2.6.6	VIBRACIONES TORSIONAL.....	36
2.6.7	VIBRACIÓN FORZADA.....	37
CAPITULO 3.....		41
DISEÑO DEL SISTEMA MAGNETOREOLÓGICO.....		41
3.1	ANÁLISIS DEL FLUIDO MAGNETOREOLÓGICO	41
3.1.1	PARÁMETROS DEL FLUIDO MAGNETOREOLÓGICO	41
3.1.1.1	La naturaleza de las partículas.....	42
3.1.1.2	La concentración de las partículas	42
3.1.1.3	La densidad de las partículas	43
3.1.1.4	El tamaño y la distribución de las partículas.....	43
3.1.1.5	La naturaleza del fluido portador.....	43
3.1.1.6	La densidad del fluido portador.....	44
3.1.1.7	La viscosidad del fluido portador	44
3.1.1.8	Los aditivos adicionales	44
3.1.2	OBTENCIÓN DEL FLUIDO MAGNETOREOLÓGICO	45
3.1.2.1.	Selección del material	45
3.1.2.2.	Recolección de partículas	45
3.1.2.3.	Primer procesamiento de las partículas	47
3.1.2.4.	Segundo Procesamiento de las partículas	54
3.1.2.5.	Obtención del líquido portador	58

3.1.3	SELECCIÓN DEL MÉTODO DE MEDICIÓN PARA LA VISCOSIDAD	60
3.1.4.1	Viscosímetro de caída libre.....	60
3.1.4.2	Viscosímetro Saybolt.....	61
3.1.4.3	El viscosímetro Brookfield	62
3.1.4	ENSAYOS DE MEDICIÓN DE VISCOSIDAD EN UN FLUIDO MAGNETOREOLÓGICO	65
3.1.4.1	Objetivos	65
3.1.4.2	Materiales y Equipos.....	65
3.1.4.3	Procedimiento	65
3.1.4.4	Desarrollo de Ensayos	67
3.1.4.5	Resultados	71
3.1.4.6	Conclusiones.....	74
3.2	DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO	77
3.2.1	DESMONTAJE DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS DEL AMORTIGUADOR	77
3.2.2	ADAPTACIÓN DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS DEL AMORTIGUADOR	79
3.2.2.1	Vástago.....	80
3.2.2.2	Limitador de flujo.....	82
3.2.2.3	Carrete.....	85
3.2.2.4	Cilindro	86
3.2.3	MONTAJE DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS DEL AMORTIGUADOR	88
3.3	DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL ELECTROIMÁN	90
CAPITULO 4	93
ANÁLISIS DEL SISTEMA MECÁNICO	93
4.1	DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA METÁLICA	93
4.2	MONTAJE DE LOS ELEMENTOS ACTIVOS DEL SISTEMA	95

	x
4.2.1	MONTAJE DEL AMORTIGUADOR MAGNETOREOLÓGICO 95
4.2.2	MONTAJE DEL MOTOR..... 97
4.3	OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL SISTEMA..... 98
4.3.1	MEDICIÓN DE LA CONSTANTE DEL RESORTE..... 98
4.3.2	MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE AMORTIGUACIÓN 101
4.3.3	MASA SUSPENDIDA DEL SISTEMA 104
4.4	ANÁLISIS DEL CONJUNTO MECÁNICO 105
4.5	SIMULACIÓN DEL CONJUNTO MECÁNICO..... 112
4.5.1	SIMULACIÓN DEL PASADOR DEL MECANISMO DE GIRO..... 112
4.5.2	SIMULACIÓN DE LAS OREJAS..... 116
4.5.3	SIMULACIÓN DE LAS BARRAS SUPERIORES..... 119
4.5.4	SIMULACIÓN DE LAS BARRAS INFERIORES..... 123
4.5.5	SIMULACIÓN DEL EJE DEL MOTOR..... 127
4.5.6	SIMULACIÓN DE LA LEVA 137
CAPITULO 5 140
SISTEMA ELECTRÓNICO Y DE CONTROL 140
5.1	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO 140
5.1.1	MOTOR 140
5.1.2	CONTROLADOR..... 141
5.1.2.1	Características de la placa Arduino Mega 2560 142
5.1.3	SENSOR SHARP GP2D120X..... 143
5.1.3.1	Funcionamiento 143
5.1.3.2	Características..... 144
5.1.3.3	Montaje..... 146

5.1.4	TARJETA DE RELÉS DE 4 CANALES.....	147
5.1.5	MÓDULO REGULADOR DE VOLTAJE DC-DC.....	148
5.1.6	TARJETA DE CONTROL DE VOLTAJE	149
5.1.7	CIRCUITOS DE POTENCIA Y CONTROL.....	149
5.1.7.1	Circuito de potencia	150
5.1.7.2	Circuito de control.....	151
5.2	SISTEMA DE CONTROL.....	152
5.2.1	OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA.....	152
5.2.2	DISEÑO DE LA INTERFAZ GRÁFICA.....	157
5.2.3	DISEÑO DE LA INTERFAZ DE CONTROL.....	160
5.2.3.1	Inicialización	160
5.2.3.2	Adquisición de la señal	162
5.2.3.3	Análisis de la Señal	166
5.2.3.4	Control de encendido.....	167
5.2.3.5	Control de voltaje.....	168
5.2.3.6	Salida.....	169
5.3	PRUEBAS Y MEDICIONES DEL SISTEMA.....	170
5.3.1	CONSIDERACIONES PRELIMINARES.....	171
5.3.2	PRUEBAS	171
5.3.2.1	Primera Posición	171
5.3.2.2	Segunda Posición	176
CAPITULO 6	182
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	182
6.1	CONCLUSIONES	182

6.2 RECOMENDACIONES	185
----------------------------------	------------

BIBLIOGRAFIA.....	188
--------------------------	------------

TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de materiales inteligentes en función de estímulo y respuesta (sensores)...	18
Tabla 2.2. Clasificación de materiales inteligentes en función de estímulo y respuesta (actuadores)	19
Tabla 2.3. Número de polos y velocidad de los motores	29
Tabla 3.1 Comparación de Aperturas de Tamices de Malla Metalica y Chapa. Según normas standards: ISO 3310-1, 3310-2, ASTM E11, E323, UNE 7050-3, 7050-4.....	57
Tabla 3.2 Características típicas del aceite SAE 20W50	59
Tabla 3.3 Tabla de concentraciones en peso.....	67
Tabla 3.4 Viscosidad dinámica vs voltaje, para el 10% de concentración	71
Tabla 3.5 Viscosidad dinámica vs voltaje, para el 20% de concentración	71
Tabla 3.6 Viscosidad dinámica vs voltaje, para el 30% de concentración	72
Tabla 3.7 Viscosidad dinámica vs voltaje, para el 40% de concentración	73
Tabla 4.1 Datos y resultados del ensayo en el resorte.....	100
Tabla 4.2 Datos del ensayo en el amortiguador con un FRM al 0%.....	102
Tabla 4.3 Datos del ensayo en el amortiguador con un FRM al 10%.....	103
Tabla 4.4 Datos del ensayo en el amortiguador con un FRM al 20%.....	103
Tabla 5.1 Valores de la función característica del sensor Sharp GP2D120x	164
Tabla 5.2 Mediciones del tiempo de reposo y la amplitud para la primera posición	172
Tabla 5.3 Amplitud de las vibraciones a diferentes voltajes para la primera posición.....	174
Tabla 5.4 Mediciones del tiempo de reposo y la amplitud para la segunda posición.....	177

Tabla 5.5 Amplitud de las vibraciones a diferentes voltajes para la segunda posición.....	179
---	-----

FIGURAS

Figura 1.1 Partículas en el fluido magnetoreológico inducidas a un campo magnético.....	2
Figura 2.1 Diagrama de principio de viscosidad.....	9
Figura 2.2 Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido newtoniano.....	10
Figura 2.3 Esfuerzo cortante vs velocidad angular de deformación.....	11
Figura 2.4 Curvas características de los fluidos independientes del tiempo.....	12
Figura 2.5 Viscosidad aparente vs velocidad de deformación.....	12
Figura 2.6 Comportamiento de fluidos dependientes del tiempo.....	14
Figura 2.7 Comportamiento de un fluido tixotrópico en el tiempo.....	15
Figura 2.8 Fenómeno de Histéresis para fluidos dependientes del tiempo.....	15
Figura 2.9 (a) Modelo de Maxwell y (b) Relación de curvas de esfuerzo.....	17
Figura 2.10 Respuesta de fluidos magnéticos a un campo magnético exterior.....	20
Figura 2.11 Sensor de proximidad.....	23
Figura 2.12 Vibrómetro.....	24
Figura 2.13 Acelerómetro.....	25
Figura 2.14 Divisor de tensión resistivo.....	26
Figura 2.15 Partes de un motor.....	27
Figura 2.16 Sistema para tornejar una pieza, modelos vibratorios y pasos para resolución del sistema.....	31
Figura 2.17 Constantes características de un sistema de 1 GDL.....	32
Figura 2.18 Respuesta libre de un sistema no amortiguado de 1 GDL.....	34
Figura 2.19 Respuesta libre de un sistema sub-amortiguado de 1 GDL.....	34

Figura 2.20 Respuesta libre de un sistema críticamente amortiguado de 1 GDL	35
Figura 2.21 Respuesta libre de un sistema sobre-amortiguado de 1 GDL.....	35
Figura 2.22 Péndulo de Torsión	36
Figura 2.23 Respuesta forzada estado transitorio y permanente.....	38
Figura 2.24 Factor de amplificación vs relación de frecuencias para diferentes constantes de amortiguación	40
Figura 3.1 Máquina rectificadora plana	46
Figura 3.2 Limallas de acero obtenido de la máquina rectificadora plana.....	46
Figura 3.3 Secado de las limallas.....	47
Figura 3.4 Cilindro de acero y mesa con superficie de vidrio	48
Figura 3.5 Pulverizado de las limallas.....	48
Figura 3.6 Filtrado de las limallas.....	49
Figura 3.7 Estereomicroscopio	50
Figura 3.8 Adaptación de cámara digital al microscopio.....	51
Figura 3.9 Partículas metálicas primer filtro 4X.....	51
Figura 3.10 Microscopio óptico	52
Figura 3.11 Partículas metálicas primer filtrado 10X.....	54
Figura 3.12 Segundo filtrado	54
Figura 3.13 Tamices	56
Figura 3.14 Malla	57
Figura 3.15 Figura representativa del viscosímetro de caída libre.....	61
Figura 3.16 Viscosímetro de Saybolt.....	62
Figura 3.17 Viscosímetro de Brookfield CANON	63
Figura 3.18 Husillos para viscosímetro de Brookfield	64
Figura 3.19 Muestra de aceite.....	66
Figura 3.20 Pesaje de las muestras	66
Figura 3.21 Muestra de FMR al 5%.....	68
Figura 3.22 Muestra de FMR al 5% en reposo.....	69

Figura 3.23 Electroimán sumergido en la muestra de FMR.....	69
Figura 3.24 Muestra de FMR al 10% sedimentación.....	70
Figura 3.25 Viscosidad dinámica vs voltaje, para el 10% de concentración.....	71
Figura 3.29 Viscosidad dinámica vs voltaje, comparación entre FMR	75
Figura 3.30 Viscosidad dinámica vs voltaje, regresión lineal.....	76
Figura 3.31 Amortiguador bitubo	77
Figura 3.32 Prensa para sacar resorte.....	78
Figura 3.33 Corte de cilindro	78
Figura 3.34 Componentes del amortiguador.....	79
Figura 3.35 Vástago.....	80
Figura 3.36 Dimensiones del vástago.....	81
Figura 3.37 Agujero para alimentación del electroimán	82
Figura 3.38 Limitador de flujo.....	82
Figura 3.39 Dimensiones del limitador de flujo	83
Figura 3.40 Carrete	86
Figura 3.41 Dimensiones del carrete	86
Figura 3.42 Tapa del cilindro	87
Figura 3.43 Empaque de caucho y tapa del cilindro	87
Figura 3.44 Montaje en el vástago.....	88
Figura 3.46 Colocación del FMR	89
Figura 3.47 Circuito para los ensayos de medición de viscosidad	92
Figura 4.1 Estructura metálica del laboratorio de mecanismos y servomecanismos	93
Figura 4.2 Mecanismos de giro superior e inferior del amortiguador	96
Figura 4.3 Motor unión leva	97
Figura 4.4 Modelo Dinámico	106
Figura 4.5 Gráfica de transmisibilidad vs relación de frecuencias.....	109
Figura 4.6 Gráfica de Velocidad del motor vs relación de frecuencias.....	111
Figura 4.7 Conjunto mecánico en Working Model	112

Figura 4.8 Pasador de giro.....	113
Figura 4.9 Cargas producidas por el amortiguador (F_v).....	113
Figura 4.10 Cargas y sujeciones.....	114
Figura 4.11 Fuerzas cortantes.....	115
Figura 4.12 Momento producido en el pasador de giro.....	115
Figura 4.13 Orejas.....	117
Figura 4.14 Cargas y sujeciones.....	118
Figura 4.15 Barra superior.....	119
Figura 4.16 Cargas producidas por el resorte (F_k).....	120
Figura 4.17 Cargas y sujeciones.....	121
Figura 4.18 Fuerzas cortantes.....	121
Figura 4.19 Momento producido en la barra superior.....	122
Figura 4.20 Barra inferior.....	124
Figura 4.21 Cargas y sujeciones.....	125
Figura 4.22 Fuerzas cortantes.....	126
Figura 4.23 Momento producido en la barra inferior.....	126
Figura 4.24 Eje del motor.....	128
Figura 4.25 Cargas y sujeciones plano X-Y.....	130
Figura 4.26 Fuerzas cortantes plano X-Y.....	130
Figura 4.27 Momento producido en el eje plano X-Y.....	131
Figura 4.28 Cargas y sujeciones en el plano X-Z.....	131
Figura 4.29 Fuerzas cortantes plano X-Z.....	132
Figura 4.30 Momento producido en el eje plano X-Z.....	133
Figura 4.31 Leva.....	137
Figura 4.32 Diagrama de desplazamiento vs tiempo de la leva.....	138
Figura 5.1 Arduino Mega 2560.....	142
Figura 5.2 Sensor Sharp GP2D120X.....	143
Figura 5.4 Curva característica de los valores de salida del sensor GP2D120X.....	145

Figura 5.5 Conexión del sensor Sharp GP2D120X.....	146
Figura 5.6 Tarjeta de relés de 4 canales.....	147
Figura 5.7 Módulo regulador de voltaje.....	148
Figura 5.8 Tarjeta de control de voltaje.....	149
Figura 5.9 Circuito de potencia.....	150
Figura 5.10 Circuito de control.....	151
Figura 5.11 Sistema.....	153
Figura 5.12 Comportamiento del sistema a diferentes constantes de amortiguamiento.....	154
Figura 5.13 Comportamiento de un sistema con un coeficiente de amortiguamiento c_0	155
Figura 5.14 Comportamiento de un sistema con un coeficiente de amortiguamiento c_1	155
Figura 5.15 Comportamiento de un sistema con un coeficiente de amortiguamiento c_2	156
Figura 5.16 Interfaz gráfica del sistema magnetoreológico.....	157
Figura 5.17 Controles.....	158
Figura 5.18 Indicadores.....	158
Figura 5.19 Calibración.....	159
Figura 5.20 Gráficas.....	159
Figura 5.21 Inicialización.....	160
Figura 5.22 Bloque INIT.....	161
Figura 5.23 Bloque I/O.....	161
Figura 5.24 Buses de conexión entre módulos.....	162
Figura 5.25 Adquisición de la señal.....	162
Figura 5.26 Bloque While Loop.....	162
Figura 5.27 Bloque Analog Read Port.....	163
Figura 5.28 Bloque Mean.....	163
Figura 5.29 Bloque Expression Node.....	163
Figura 5.30 Curva distancia vs voltaje del sensor Sharp GP2D120x.....	165
Figura 5.31 Calibración de la señal.....	165
Figura 5.32 Bloque Amplitude and Levels.....	166

Figura 5.33 Análisis de la señal	166
Figura 5.35 Bloque Digital Write Pin	167
Figura 5.36 Control de voltaje	168
Figura 5.37 Bloque PWM Write Pin	169
Figura 5.38 Salida.....	169
Figura 5.39 Tiempo de reposo máximo primera posición	172
Figura 5.40 Distancia de reducción a diferentes voltajes para la primera posición.....	175
Figura 5.41 Porcentaje de reducción primera posición.....	176
Figura 5.42 Tiempo de reposo máximo segunda posición	177
Figura 5.43 Distancia de reducción a diferentes voltajes para la segunda posición.....	180
Figura 5.44 Porcentaje de reducción segunda posición.....	181

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objeto diseñar un sistema de control semiactivo de vibraciones, el cual es un sistema que puede controlar las vibraciones dentro de ciertos límites y utilizando pocas cantidades de energía externa. Para esto se construirá un amortiguador que utiliza fluidos magnetoreológicos con diferentes concentraciones de partículas metálicas y se lo implementará en un conjunto mecánico automatizado que permite generar vibraciones controladas. Además se desarrollará una interfaz HMI entre el sistema y el PC, para visualizar la información sobre el comportamiento del sistema, este nos permitirá analizar y determinar el porcentaje de reducción de las amplitudes de vibraciones que se generan en el sistema, a medida que se aplica un campo magnético variable. Al implementar este sistema en el laboratorio de Mecanismos y Servomecanismos del DECEM, permitirá al estudiante enfocarse en la investigación y el estudio de estos dispositivos que utilizan fluidos magnetoreológicos y que representan una solución tecnológica frente a la necesidad de la atenuación de las vibraciones mecánicas.

Palabras clave: Amortiguador, fluido magnetoreológico, interfaz HMI, campo magnético, vibraciones.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Las nuevas tecnologías para la reducción de la transmisión de vibraciones se pueden agrupar como semiactivas o activas. Las tecnologías semiactivas poseen una característica común que es la necesidad de un sensor y una fuente de energía externa para lograr su objetivo, diferenciándose de las tecnologías activas porque actúan sobre el sistema introduciendo nuevas fuerzas dinámicas (Sánchez, 2012).

Debido al gran esfuerzo investigador en el desarrollo de nuevos materiales y en la búsqueda de nuevas aplicaciones de los mismos, se está permitiendo que las tecnologías tradicionales de aislamiento de vibraciones evolucionen con lo que se denominan materiales adaptativos o inteligentes.

Entre estos materiales 'inteligentes', tenemos los fluidos magnetoreológicos, los cuales están compuestos por partículas ferromagnéticas de tamaño micrométricas dispersas en un líquido portador, cuyas propiedades reológicas pueden ser modificadas mediante la aplicación de un campo magnético. Las partículas dispersas adquieren un momento dipolar que genera una fuerza atractiva entre estas, obligando a la formación de collares o cadenas alineadas con el campo magnético como se puede observar en la figura 1.1, razón por la cual se da el drástico cambio en

su comportamiento reológico. Este cambio se manifiesta mediante el desarrollo de un esfuerzo producido monótonicamente que crece con el campo aplicado, de ahí su habilidad para proveer una simple, silenciosa y rápida respuesta en el interface entre controles electrónicos y sistemas mecánicos.

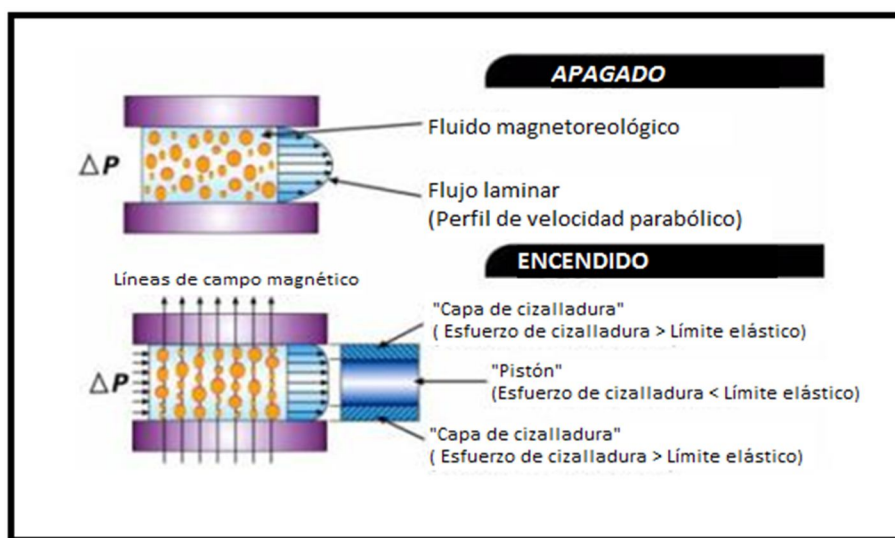


Figura 1.1 Partículas en el fluido magnetoreológico inducidas a un campo magnético

Fuente: Propia de los autores

La ventaja más grande de estos fluidos sobre otras interfaces convencionales es su habilidad de alcanzar una amplia variedad de rangos de viscosidad (varias magnitudes) en fracciones de milisegundos.

Los fluidos magnetoreológicos se están utilizando principalmente en el desarrollo de sistemas de suspensión y amortiguadores avanzados, debido a que se pueden conseguir comportamientos elásticos y amortiguados que pierdan rigidez cuando tengan que aislar frecuencias bajas, pero que se rigidicen cuando sea necesaria una mejor estabilidad, de esta manera se pueden desarrollar amortiguadores sintonizados que siempre estén

adaptados a la frecuencia de trabajo, o amortiguadores que solo amortigüen cuando sea necesario, eliminando o reduciendo las limitaciones que tienen los elementos tradicionales (Elizondo, 1998).

Otros ejemplos de aplicaciones de los fluidos magnetoreológicos en distintos sectores industriales son:

- Automoción: en amortiguadores de suspensiones (por ejemplo 2002 Cadillac Seville STS del 2002 y Chevrolet Corvette del 2003), en sistemas de crash, en botoneras, sistemas de cerradura, embragues, sistemas de dirección asistido.
- Vehículos especiales, para la construcción y para la agricultura: al igual que en automoción pero con el uso también de suspensiones para cabinas y para asientos.
- Industrial: en lavadoras

En Ecuador, en algunas universidades e industrias, se está realizando la investigación de los fluidos reológicos, y su aplicación en diferentes campos y procesos como son: el tratamiento del producto asfáltico, la emulsión de petróleos, en el mejoramiento de los productos orgánicos, el mejoramiento de los procesos de productos de carácter alimenticios, entre otros.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Los cambios actuales en el ambiente de manufactura están caracterizados por una agresiva competencia a nivel global y por rápidos cambios en la tecnología de procesos. Esto requiere de la creación de sistemas de producción que puedan ser fácilmente actualizados y en los

cuales nuevas tecnologías y nuevas funciones puedan ser integradas rápidamente.

En Estados Unidos, la industria, el gobierno y otras instituciones han identificado tendencias en los materiales y la manufactura para el 2020. El comité sobre la visión de la tecnología de los materiales, en la publicación de TechnologyVision 2020-The U.S. (Investigación y Extensión del Campus Monterrey, 2006), identificó objetivos en cinco principales áreas:

- Nuevos materiales.
- Caracterización de materiales.
- Modelado y predicción de materiales.
- Aditivos.
- Reciclaje.

Destaca en esta visión el desarrollo de materiales “inteligentes”, que tienen propiedades para auto repararse, actuar y transformar un tipo de energía en otro tipo de salida: polímeros, metales, cerámicos y fluidos con características especiales, usados actualmente en diversidad de dispositivos.

Tomando en cuenta esta visión tecnológica y conociendo los objetivos de la Escuela Politécnica del Ejército que procura “...generar, aplicar y difundir el conocimiento y proporcionar e implantar alternativas de solución a los problemas de la colectividad, para promover el desarrollo integral del Ecuador.”, creemos que se puede impulsar el desarrollo de la tecnología nacional, a medida que se promueva el estudio, diseño y manufactura de nuevos materiales y componentes, así como de la creación de sistemas

adaptables e integrables que puedan estar listos para ser reconfigurados de acuerdo con los requerimientos del ambiente tecnológico del país.

De esta manera se pretende difundir y actualizar el conocimiento de estos nuevos materiales, y fomentar la competitividad tecnológica de la universidad, con el desarrollo de aplicaciones que están relacionadas con la implementación de estos nuevos sistemas.

Es importante por lo tanto la implementación de un sistema de control semiactivo usando fluidos magnetoreológicos en los laboratorios de Mecanismos y Servomecanismos del DECEM, ya que permiten al estudiante enfocarse en la investigación, el estudio integral y el desarrollo tecnológico al tener un contacto con estos sistema que representan soluciones tecnológicas frente a la necesidad de la atenuación de las vibraciones mecánicas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GENERAL

Diseñar, construir e implementar un sistema de control semiactivo de vibraciones utilizando fluidos magnetoreológicos para el laboratorio de mecanismos y servomecanismos del DECEM.

1.3.2 ESPECÍFICOS

- Diseñar un amortiguador magnetoreológico, de manera que este facilite la aplicación de varias muestras de fluidos magnetoreológicos

con diferentes concentraciones, a fin de realizar distintas pruebas y mediciones.

- Automatizar el conjunto mecánico que se encuentra en el laboratorio de mecanismo y servomecanismos, para generar vibraciones controladas.
- Desarrollar la interfaz HMI entre el sistema y el PC, para visualizar el comportamiento de las vibraciones ejercidas sobre el sistema y monitorear el voltaje, la intensidad y velocidad del motor.
- Realizar el control sobre el amortiguador magnetoreológico, a fin de determinar el porcentaje de reducción de las amplitudes de vibraciones que se generan en el sistema, a medida que se aplica un campo magnético.

1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

Se enfoca en el diseño y construcción de un sistema de control semiactivo de vibraciones utilizando fluidos magnetoreológicos y su implementación en el Laboratorio de Mecanismos y Servomecanismos del DECEM a fin de determinar la amplitud de vibraciones que se va a reducir en el sistema a medida que varía la viscosidad de un fluido magnetoreológico.

Para este proyecto se van a realizar pruebas sobre este sistema amortiguador magnetoreológico, que estará sometido a las siguientes condiciones de funcionamiento:

- a) Se utilizará diferentes muestras de fluido magnetoreológico (FMR), que contengan 0, 10, 20, 30, 40% de partículas de acero con referencia al peso total del fluido, para así determinar la proporción adecuada para el sistema. Se realizarán pruebas para analizar el comportamiento de FMR y apreciar la variación de la viscosidad a medida que el porcentaje vaya aumentando hasta el 40%; no siendo mayor para evitar el fenómeno de sedimentación de las partículas de hierro (Lord Corporation, 2013).
- b) Variando el voltaje que ingresa al electroimán del amortiguador MR desde 0, 2, 4, 6, 8, 10 hasta 12 voltios; y a una corriente de alimentación impulsada por la salida de 1 amperio, esto de acuerdo a los estudios sobre las características y aplicaciones de los fluidos MR, realizados por Carlson y Spencer en 1996a (Carlson, 1996).

Los resultados de las pruebas serán analizados con criterios técnicos a fin de obtener la información necesaria para determinar el comportamiento del amortiguador magnetoreológico a los escenarios propuestos.

El sistema será accionado por un motor eléctrico, cuyo movimiento se transmitirá hacia un mecanismo, que consta de un conjunto leva-seguidor y esta a su vez al soporte en voladizo, para generar los desplazamientos y vibraciones axiales en el amortiguador.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 PRINCIPIO DE VISCOSIDAD

Para que exista movimiento de un cuerpo a través de un fluido o para el movimiento del fluido dentro de un conducto se debe ejercer una fuerza que sobrepase la resistencia ofrecida por el fluido. La magnitud de la resistencia ofrecida por el fluido es una resistencia a la deformación y estará determinada por la velocidad de deformación y por una propiedad del fluido denominada viscosidad (Rivera, 2001).

Entonces la viscosidad se puede definir como la resistencia de los fluidos a fluir. A mayor viscosidad, menor flujo. En términos microscópicos se relaciona con las fuerzas intermoleculares, y con el tamaño y forma de las moléculas que constituyen el líquido.

Para comprender el principio de viscosidad consideramos que entre dos placas paralelas de igual superficie y separadas por una distancia h se encuentra un fluido homogéneo a temperatura constante, como se ve en la figura 2.1.

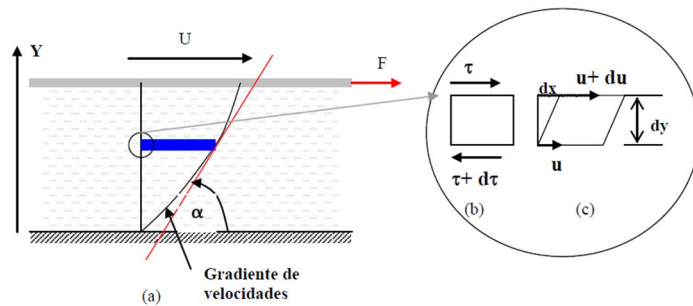


Figura 2.1 Diagrama de principio de viscosidad

Fuente: (Rivera, 2001)

De la figura 2.1 se puede escribir la siguiente relación para la velocidad de deformación angular:

$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta t} = \frac{\Delta x / \Delta y}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \frac{1}{\Delta y} = \frac{\Delta u}{\Delta y}$$

Ya que para valores pequeños de α , se tiene que: $\alpha = \text{tg}(\alpha) = x/y$.

Entonces en el límite:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta y} \rightarrow \frac{d\alpha}{dt} = \frac{du}{dy} \quad 2.1$$

Es decir que la deformación angular que sufre el elemento de fluido cuando es sometido a un esfuerzo de corte, es igual al gradiente de velocidad en la dirección y (du/dy). Entonces, se puede decir que la tensión en la cara superior del elemento diferencial de fluido es directamente proporcional a la velocidad de deformación, lo que concuerda con el principio de Newton.

$$\tau \propto \frac{du}{dy} \quad 2.2$$

Introduciendo un coeficiente de proporcionalidad μ , se tiene finalmente:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad 2.3$$

La última ecuación es la llamada ecuación de Newton de la viscosidad y el coeficiente de proporcionalidad μ , es el llamado coeficiente de viscosidad dinámica.

2.2 TIPOS DE FLUIDOS

2.2.1 FLUIDOS NEWTONIANOS

Un fluido newtoniano se caracteriza por cumplir la Ley de Newton, es decir, que existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Si se duplica el esfuerzo cortante, la velocidad de deformación se duplicará. Esto debido a que el término μ (viscosidad) es constante para este tipo de fluidos y no depende del esfuerzo cortante aplicado (Ramirez, 2006).

Hay que tener en cuenta también que la viscosidad de un fluido newtoniano no depende del tiempo de aplicación del esfuerzo, aunque sí puede depender tanto de la temperatura como de la presión a la que se encuentre. Para un fluido newtoniano se obtienen las siguientes curvas (Figura 2.2).

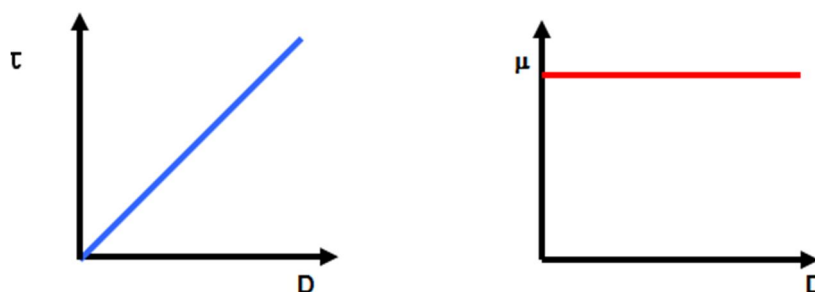


Figura 2.2 Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido newtoniano

Fuente: (Ramirez, 2006)

Como se puede observar, el valor de la viscosidad μ es la tangente del ángulo que forman el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación. Además se observa en la curva de viscosidad que la viscosidad es constante para cualquier velocidad de deformación aplicada. Algunos ejemplos del fluido newtoniano se muestran en la figura 2.3.

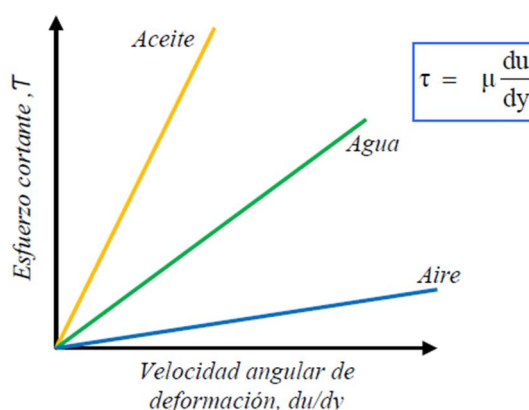


Figura 2.3 Esfuerzo cortante vs velocidad angular de deformación

Fuente: (Rivera, 2001)

2.2.2 FLUIDOS NO NEWTONIANOS

Los fluidos no newtonianos son aquellos en los que la relación entre esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no es lineal. Estos fluidos pueden clasificarse según su comportamiento en: *fluidos dependientes del tiempo*, *fluidos independientes del tiempo* y *fluidos viscoelásticos* (Hermida Bun, 2000).

2.2.2.1 Fluidos independientes del tiempo

2.2.2.1.1 Fluidos reo-fluidificantes: (shear-thinning)

Este tipo de fluidos presenta un comportamiento que se caracteriza por una disminución de su viscosidad aparente y de su esfuerzo cortante, con la

velocidad de deformación. Este comportamiento se puede observar en las figuras 2.4 y 2.5 (Steffe, 1996).

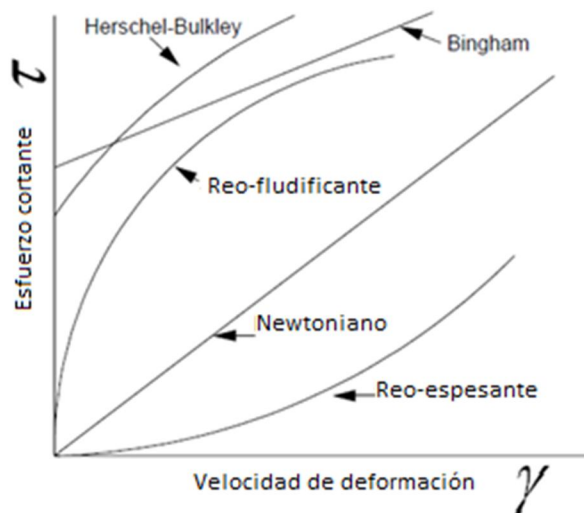


Figura 2.4 Curvas características de los fluidos independientes del tiempo

Fuente: Propia de los autores

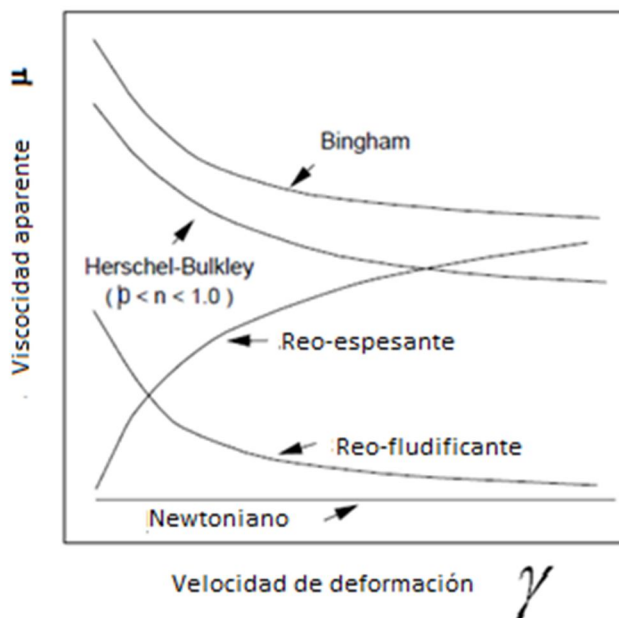


Figura 2.5 Viscosidad aparente vs velocidad de deformación

Fuente: Propia de los autores

Ejemplos de fluidos reo-fluidificantes son: algunos tipos de ketchup, mostaza, algunas clases de pinturas, suspensiones acuosas de arcilla, etc.

2.2.2.1.2 Fluidos reo-espesantes: (shear-thickening)

Los fluidos reo-espesantes presentan un comportamiento caracterizado por un aumento de la viscosidad al aumentar la velocidad de deformación. En la figuras 2.4 y 2.5 se puede observar dicho comportamiento.

Ejemplos de este tipo de fluidos son: la harina de maíz, las disoluciones de almidón muy concentradas, la arena mojada, dióxido de titanio, etc.

2.2.2.1.3 Fluidos viscoplásticos.

Este tipo de fluido se comporta como un sólido hasta que sobrepasa un esfuerzo cortante mínimo (esfuerzo umbral) y a partir de dicho valor se comporta como un líquido.

En este fluido se forman coloides cuyas fuerzas repulsivas tienden a formar estructuras de tipo gel, rodeados de una *capa de adsorción*, gracias a esta capa, las partículas se inmovilizan hasta que no se aplican sobre ellas un esfuerzo cortante determinado.

Los fluidos plásticos, a su vez, se diferencian en la existencia de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, a partir de su esfuerzo umbral. Si existe proporcionalidad, se denominan fluidos plásticos de Bingham (ver figuras 2.4 y 2.5), y si no existe, se denominan solo plásticos.

Algunos *ejemplos* de comportamiento plástico son el chocolate, la arcilla, la mantequilla, la pasta de dientes, las emulsiones, las espumas, etc.

2.2.2.2 Fluidos dependientes del tiempo de aplicación

Este tipo de fluidos se clasifican en dos tipos: los fluidos *tixotrópicos*, en los que su viscosidad disminuye al aumentar el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante, recuperando su estado inicial después de un reposo prolongado, y los fluidos *reopécticos*, en los cuales su viscosidad aumenta con el tiempo de aplicación de la fuerza y vuelven a su estado anterior tras un tiempo de reposo (ver figura 2.6).

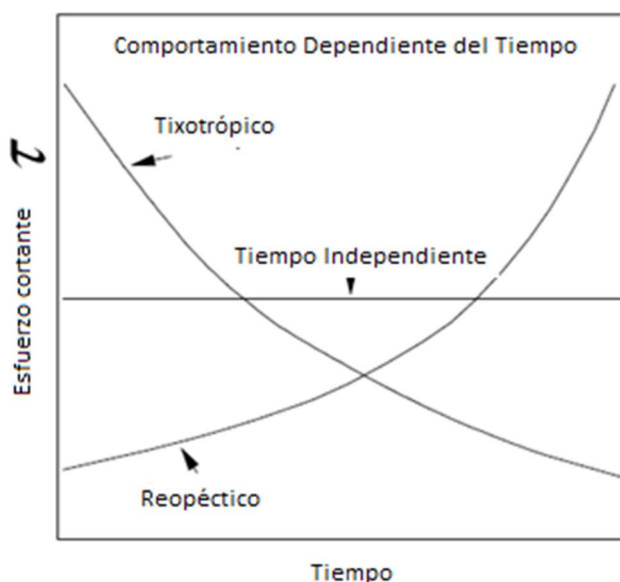


Figura 2.6 Comportamiento de fluidos dependientes del tiempo

Fuente: Propia de los autores

2.2.2.2.1 Fluidos tixotrópicos

Los fluidos tixotrópicos se caracterizan por un cambio de su estructura interna al aplicar un esfuerzo. Esto produce la rotura de las largas cadenas que forman sus moléculas.

Estos cambios estructurales hacen que disminuya la viscosidad con el aumento de la velocidad de deformación y que está muy influenciada por el

tiempo, la estructura puede volver a recuperar su forma inicial dejándola un tiempo de reposo.

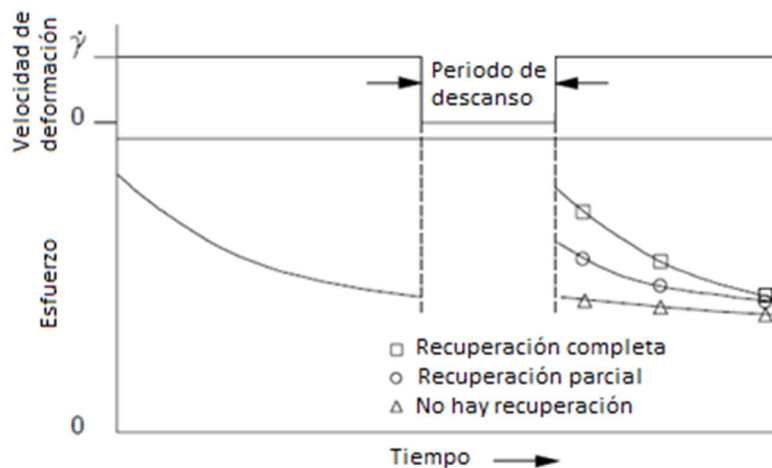


Figura 2.7 Comportamiento de un fluido tixotrópico en el tiempo

Fuente: Propia de los autores

La viscosidad va disminuyendo al aplicar una fuerza y acto seguido vuelve a aumentar al cesar dicha fuerza, debido a la reconstrucción de sus estructuras y al retraso que se produce para adaptarse al cambio. Aparece un fenómeno de *Histéresis* (ver figura 2.8).

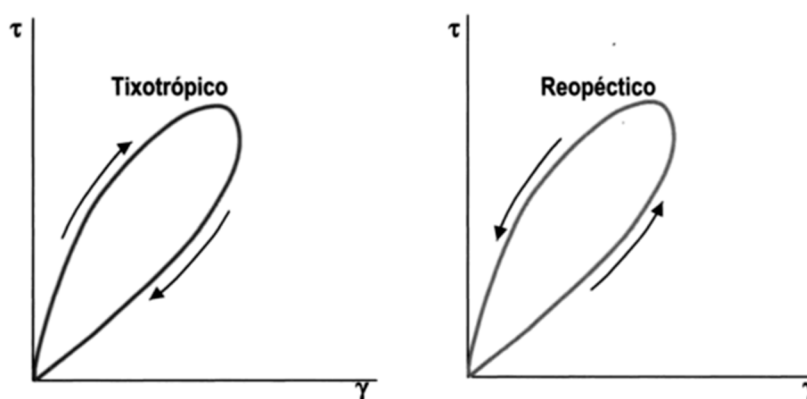


Figura 2.8 Fenómeno de Histéresis para fluidos dependientes del tiempo

Fuente: (Hermida Bun, 2000)

Las razones de este comportamiento son diversas. Si se considera al fluido como un sistema disperso, se debe tener en cuenta que las partículas que hay en él poseen diferentes potenciales eléctricos y tienden a formar estructuras variadas dependiendo de cómo sea la fase dispersa.

Ejemplos típicos de fluidos tixotrópicos son: las pinturas, el yogur, las tintas de impresión, la salsa de tomate, algunos aceites del petróleo, el nylon, etc.

2.2.2.2.2 Fluidos reopécticos

Los fluidos reopécticos, en cambio, se caracterizan por tener un comportamiento contrario a los tixotrópicos, es decir, que su viscosidad aumenta con el tiempo y con la velocidad de deformación aplicada y presentan una histéresis inversa a estos últimos.

Esto es debido a que si se aplica una fuerza se produce una formación de enlaces intermoleculares conllevando a un aumento de la viscosidad, mientras que, si cesa ésta se produce una destrucción de los enlaces, dando lugar a una disminución de la viscosidad.

Existen pocos fluidos de este tipo. Algunos *ejemplos* son: el yeso y la arcilla bentonítica, entre otros.

2.2.2.3 Fluidos Viscoelásticos

Los fluidos viscoelásticos se caracterizan por presentar a la vez tanto propiedades viscosas como elásticas. Esta mezcla de propiedades puede

ser debida a la existencia en el líquido de moléculas muy largas y flexibles o también a la presencia de partículas líquidas o sólidos dispersos.

Para el comportamiento más simple, las propiedades viscosas se adaptan a la Ley de Newton y las elásticas a la Ley de Hooke. Este modelo se puede representar con el modelo de Maxwell (ver figura 2.9).

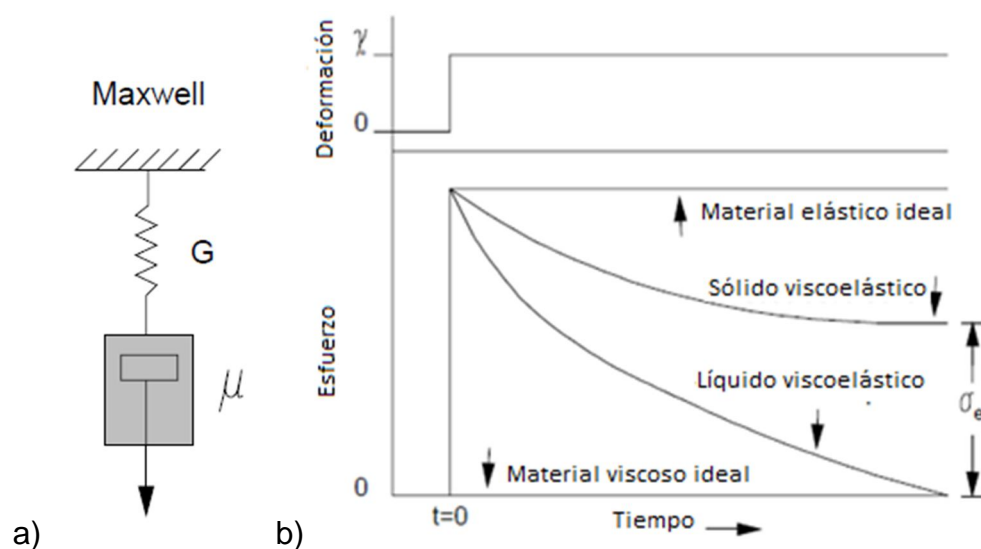


Figura 2.9 (a) Modelo de Maxwell y (b) Relación de curvas de esfuerzo
Fuente: (Ramirez, 2006)

Ejemplos de fluidos viscoelásticos son la nata, la gelatina, los helados.

2.3 MATERIALES INTELIGENTES

Todos nosotros reaccionamos ante el mundo que nos rodea como “sensores” cuando oímos, vemos o sentimos, y como “actuadores” cuando reaccionamos a esos estímulos. Con el devenir de los años, la investigación tomó el camino de intentar dotar de una capacidad de reacción similar a los materiales, convirtiéndolos en “inteligentes” (Fundacion Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT), 2011).

Los materiales inteligentes, también denominados materiales activos o materiales multifuncionales, son aquellos que manifiestan un cambio en sus propiedades o en su forma como respuesta a los estímulos del entorno en el que se encuentran. Estos estímulos externos (físicos o químicos) pueden ser tales como la presión, temperatura, humedad, pH, campos eléctricos o magnéticos, etc.

Si bien es complejo definirlos, más complejo es intentar clasificarlos; ya que la línea que separa las diversas familias de materiales no siempre tiene el mismo grosor y no todos los expertos coinciden en cuáles deben ser los materiales que se incluyen en la clase de los inteligentes. En las tablas 2.1 y 2.2, se propone una posible clasificación de los mismos, diferenciando entre sensores y actuadores.

Tabla 2.1 Clasificación de materiales inteligentes en función de estímulo y respuesta (sensores)

	MATERIALES	ESTÍMULO	RESPUESTA	
SENSORES	Fotoactivos	Electroluminiscentes	Campo Eléctrico	Emisión de Luz
		Fotoluminiscentes	Luz	
		Quimioluminiscentes	Estímulo químico	
		Termoluminiscentes	Temperatura	
	Cromoactivos	Electrocromicos	Campo Eléctrico	Color
		Termocromico	Temperatura	
		Fotocromico	Luz	
		Quimiocromicos	Estímulo químico	
	Materiales bioactivos		Temperatura, luz, campo eléctrico	Varias
	Magnetostrictivos		Deformación mecánica Campo Magnético/Eléctrico	Campo Magnético/Eléctrico Deformación mecánica
	Electrostrictivos		Deformación mecánica	Polarización eléctrica
	Electrocerámicas		Deformación mecánica Corriente eléctrica	Corriente eléctrica Deformación mecánica
	Polímeros electroactivos		Deformación mecánica	Polarización eléctrica
Piroeléctricos		Temperatura	Polarización eléctrica	

Fuente: Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT), Fundación OPTI Octubre 2011

Tabla 2.2. Clasificación de materiales inteligentes en función de estímulo y respuesta (actuadores)

	MATERIALES	ESTÍMULO	RESPUESTA	
ACTUADORES	Termoeléctricos	Calor	Corriente eléctrica	
	Piezoeléctricos	Deformación mecánica Corriente eléctrica	Corriente eléctrica Deformación mecánica	
	Electrostrictivos	Deformación mecánica	Polarización eléctrica	
	Magnetostrictivos	Deformación mecánica Campo Magnético/Eléctrico	Campo Magnético/Eléctrico Deformación mecánica	
	Polímeros electroactivos	Campo eléctrico/ pH	Deformación mecánica	
	Magnetoreológicos	Elastómero MR	Campo Magnético	Viscosidad
		Fluido MR		
		Ferrofluido		
	Electroreológicos	Elastómero ER	Campo Eléctrico	Viscosidad
		Fluido ER		
Materiales Memoria de Forma	Shape Memory Alloys, SMA	Temperatura	Deformación mecánica	
	Polímeros SMA			
	Ferromagnéticos SMA, FSMA	Campo Magnético		

Fuente: Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT), Fundación OPTI Octubre 2011

En las dos tablas encontramos materiales de naturalezas muy diversas como los polímeros, metales y aleaciones de los mismos, cerámicas, electrocerámicas, materiales compuestos o biomateriales, que responden a estímulos diferentes como la temperatura, luz, deformación, pH, campos magnéticos o corrientes eléctricas.

Las respuestas que provocan estos estímulos en los materiales también son muy variadas e incluyen cambios de la viscosidad, color, de forma, en su red cristalográfica o de estados energéticos de sus electrones.

2.4 FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS

2.4.1 DEFINICIÓN

Los fluidos magnetoreológicos (FMR), responden a la aplicación de un campo magnético con un cambio en su comportamiento reológico y están formados por partículas magnetizables finamente divididas y suspendidas en un líquido portador, tal como aceite mineral, keroseno, etc. o en un sólido portador con elasticidad suficiente para permitir la orientación de los dipolos ante el campo magnético externo.

La respuesta producida en los fluidos magnetoreológicos, es el resultado de la polarización inducida en las partículas suspendidas mediante la aplicación de un campo externo. La interacción entre los dipolos inducidos resultantes, obliga a las partículas a formar estructuras en forma de cadenas, paralelas al campo aplicado como se muestra en la figura 2.10.

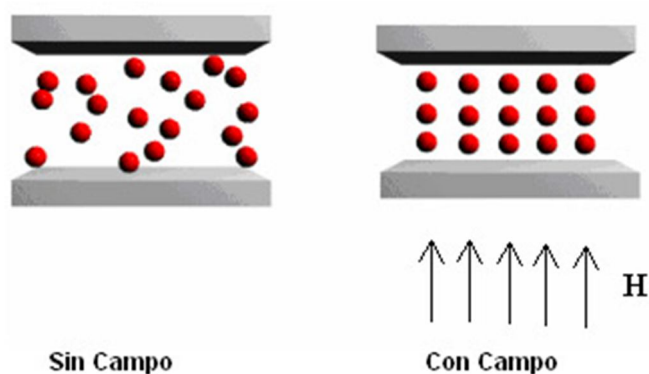


Figura 2.10 Respuesta de fluidos magnéticos a un campo magnético exterior

Fuente: Propia de los autores

Este tipo de estructuras forman una estructura similar a una cadena, la cual restringe el movimiento del fluido dando lugar a un incremento en las características viscosas de la suspensión. La energía mecánica necesaria

para producir estas estructuras tipo cadena se incrementa conforme se aumenta el campo aplicado, produciéndose un esfuerzo dependiente del campo. En ausencia del campo aplicado, los fluidos magnetoreológicos muestran un comportamiento Newtoniano.

2.4.2 COMPOSICIÓN

Un FMR típico contiene del 20 al 40% de partícula de hierro del volumen total neto, dichas partículas son suspendidas generalmente en aceite mineral, aceite sintético, etc. Los aceites hidrocarburos son preferidos porque son muy buenos lubricantes, durables, estables, los aditivos evitan la sedimentación de las partícula de hierro y existen en el mercado un gran variedad de fluidos con diferentes viscosidades. Otro factor que interviene en el desarrollo de la fuerza en el fluido es la curva de saturación magnética de las partículas suspendidas.

Es recomendable que el nivel de saturación magnética de las partículas sea grande para así obtener un buen FMR. Las aleaciones de hierro y cobalto tienen una de las mejores niveles de saturación magnética, esto es alrededor de 2.4 teslas, pero el precio de este tipo de material es muy alto, por lo que no es muy utilizado para aplicaciones prácticas y comerciales; podemos utilizar entonces partículas de hierro carbono que tienen una saturación magnética de 2.15 teslas. El tamaño de las partículas influye en la suspensión de las mismas en el fluido, esto es, mientras menor sea el tamaño de las partículas la suspensión en el fluido es mucho mejor, favoreciendo la regulación de la dureza de amortiguación; caso contrario

mientras mayor sea el tamaño de las partículas se torna difícil la suspensión de las mismas en el fluido y por consiguiente la regulación de la amortiguación (YANG, 2001).

2.4.3 ÁREAS DE APLICACIÓN

Se trata de materiales que pueden ser muy competitivos y que, de hecho, ya lo están siendo y que además apenas cuentan con tecnologías competidoras con similares prestaciones y precio, especialmente en lo que respecta a la gestión de la energía del impacto, es decir, para la gestión de colisiones en automoción.

Sin embargo, tienen aún gran margen de mejora principalmente en cuanto a su durabilidad. Se trata de materiales con mayor potencial de impacto en el sector del transporte y que desde la perspectiva de sostenibilidad medioambiental, el único obstáculo puede estar relacionado con la reciclabilidad.

Por otro lado ofrecen grandes ventajas teniendo en cuenta su sostenibilidad social ya que contribuyen a la mejora de los sistemas de transporte y porque tienen un importante impacto en el confort de los usuarios de dichos sistemas. Sus aplicaciones específicas incluyen válvulas, sistemas de embragues y frenos, al igual que control de vibraciones y sistemas de absorción de impacto, así como neumáticos.

2.5 SENSORES Y ACTUADORES

2.5.1 SENSOR DE VIBRACIÓN

Cuando se desea obtener información acerca del comportamiento de máquinas vibratorias, los transductores más comúnmente utilizados son los de proximidad, los vibrómetros y los acelerómetros (T.A.V. Multimedia, 2009).

2.5.1.1 SENSOR DE PROXIMIDAD

El sensor de proximidad funciona generando un campo electromagnético. Cuando un cuerpo metálico se acerca o se aleja de él, se modifica la magnitud del campo magnético proporcionalmente a la distancia que existe entre la punta del sensor y el cuerpo metálico.

Luego, el sensor entrega una señal eléctrica cuyo voltaje es proporcional a la magnitud del campo magnético. La Figura 2.11 muestra un sensor de proximidad.



Figura 2.11 Sensor de proximidad

Fuente: (T.A.V. Multimedia, 2009)

2.5.1.2 VIBRÓMETRO

Los vibrómetros miden velocidades de vibración y están conformados por una masa magnética colocada sobre un resorte y rodeada por una bobina. El voltaje generado por el movimiento de la masa dentro de la

bobina es proporcional a la velocidad de la superficie en la cual es montado el instrumento. Integrando esta señal, puede obtenerse el desplazamiento, (ver Figura 2.12).



Figura 2.12 Vibrómetro

Fuente: (T.A.V. Multimedia, 2009)

2.5.1.3 ACELERÓMETRO

El acelerómetro es uno de los transductores más versátiles, siendo el más común el piezoeléctrico por compresión. Este se basa en que, cuando se comprime un retículo cristalino piezoeléctrico, se produce una carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada.

Los elementos piezoeléctricos están hechos normalmente de circonato de plomo. Los elementos piezoeléctricos se encuentran comprimidos por una masa, sujeta al otro lado por un muelle y todo el conjunto dentro de una caja metálica. Cuando el conjunto es sometido a vibración, el disco piezoeléctrico se ve sometido a una fuerza variable, proporcional a la aceleración de la masa. Debido al efecto piezoeléctrico se desarrolla un potencial variable que será proporcional a la aceleración. Dicho potencial

variable se puede registrar sobre un osciloscopio o voltímetro (ver Figura 2.13).



Figura 2.13 Acelerómetro

Fuente: (T.A.V. Multimedia, 2009)

2.5.2 SENSOR DE TENSIÓN

Se deben emplear transductores adecuados de tensión y corriente que permitan las mediciones en el rango más amplio posible, sin perder linealidad ni confiabilidad, sobre todo en la parte baja de la escala por su sensibilidad y en los rangos más altos por su seguridad (robustez).

Para obtener una tensión proporcional a la que está aplicada sobre la carga, se puede emplear un divisor resistivo o un transformador reductor que permite a su vez contar con aislamiento galvánico respecto de la red.

El sensor de tensión entrega una señal proporcional a la tensión primaria fase-tierra (ver figura 2.14). Las principales ventajas de esta medición son las buenas características en lo inherente a las condiciones de gran rango dinámico y alta linealidad (ABB Group, 2010).

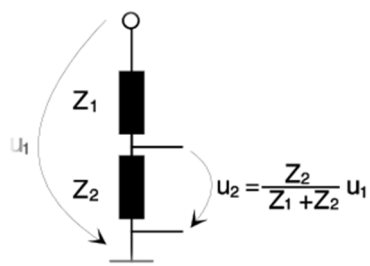


Figura 2.14 Divisor de tensión resistivo

Fuente: (ABB Group, 2010)

2.5.3 SENSORES DE CORRIENTE

2.5.3.1 Resistencia shunt

Es una resistencia de alambre que posee un coeficiente muy bajo de temperatura y que se coloca en serie con la carga permitiendo obtener una tensión entre sus bornes, proporcional a la corriente por la misma. Si bien existe una inductancia parásita en esta resistencia, ésta sólo presenta alteraciones en la medición si la frecuencia es relativamente alta. Además no existe aislación galvánica entre el sensor y los dispositivos que realizan la presentación de las mediciones (Marder, Franco, & Lombardero, 2003).

2.5.3.2 Sensor de efecto Hall

Existen dos tipos de sensores Hall. El de anillo abierto (open loor) y el anillo cerrado (closet loor). El segundo ofrece mejor precisión y rangos dinámicos más altos pero son más caros. En general tienen muy buena respuesta en frecuencia y pueden medir corrientes elevadas. Tienen como desventajas el problema de las derivas con la temperatura, la necesidad de circuitos externos de control y su elevado costo.

2.5.4 MOTORES ELÉCTRICOS

Los motores eléctricos convierten la electricidad en energía mecánica apta para mover los accionamientos de una variedad de equipos; son utilizados en tornos, ventiladores, extractores, bandas transportadoras, bombas de agua, compresores, taladros y en múltiples aplicaciones en las empresas (Fundación Red de Energía - BUN-CA, 2010). La Figura 2.15 muestra un motor eléctrico con sus partes principales.

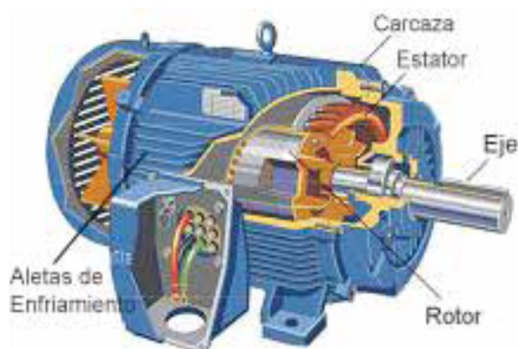


Figura 2.15 Partes de un motor

Fuente: (Fundación Red de Energía - BUN-CA, 2010)

El funcionamiento de un motor se logra circulando corriente eléctrica en el embobinado de cobre de la parte fija (estator), lo cual genera un campo magnético. Al interactuar con el campo magnético de la parte móvil (rotor), se produce el movimiento de giro. El motor eléctrico usa los polos magnéticos (que funcionan como imanes) para producir el movimiento del rotor. Este movimiento es transmitido al exterior por medio de un eje o flecha para accionar equipos mecánicos.

La potencia de salida mecánica del motor está definida por el torque y la velocidad. El torque se refiere al equivalente de una fuerza por distancia que

es capaz de ejercer un motor en cada giro, la velocidad es la cantidad de veces que gira el eje del motor en un minuto.

Tipos de motores

a. Motores de corriente directa

Los motores de corriente directa o continua como también se les llama presentan la ventaja de tener una gran capacidad para regular su velocidad de rotación, lo cual los hace necesarios en ciertos tipos de aplicaciones en las que se precisa un ajuste fino de la velocidad y el torque.

No obstante, los motores de corriente directa necesitan una alimentación eléctrica diferente a la que suministran las empresas de distribución, por ello, utilizan equipos adicionales como rectificadores de potencia, en los que la corriente alterna es convertida a directa y, en ocasiones, se requiere instalar baterías de reserva, lo cual incrementa los costos iniciales de este tipo de motor.

b. Motores de corriente alterna

Por las grandes ventajas que tiene de recibir la corriente alterna de la empresa de distribución eléctrica, la gran mayoría de los equipos que requieren de un motor eléctrico utilizan los de corriente alterna, preferentemente en forma trifásica, aunque existen muchos de baja potencia que reciben sólo una fase eléctrica (denominados monofásicos).

Los motores de corriente alterna también pueden variar la velocidad y torque que entregan al equipo acoplado, para ello deben instalarse en combinación con un regulador electrónico de velocidad variable, conocidos

en el lenguaje industrial como “drivers”, “variadores de frecuencia” o “convertidores de frecuencia variable”.

Esta ventaja está haciendo que los motores de corriente directa sean paulatinamente reemplazados por otros de corriente alterna con variador de velocidad integrado, por lo que gran parte de los sistemas electromecánicos modernos ya no incluyen motores de corriente directa.

c. Motores de corriente alterna: síncronos y asíncronos

En los síncronos, el eje gira a la misma velocidad que lo hace el campo magnético, mientras que en los asíncronos el eje revoluciona a una velocidad poco menor a la del campo magnético.

Los motores asíncronos basan su funcionamiento en la creación de un campo magnético giratorio en el entrehierro, que es el espacio comprendido entre el rotor y el estator, debido a la circulación de corriente alterna por los devanados trifásicos y la influencia de los polos magnéticos del estator.

La velocidad de giro de un motor eléctrico es determinada por el número de polos magnéticos: cuantos más polos, el motor revolucionará más lentamente. La Tabla 2.3 indica la velocidad de giro del campo magnético en función del número de polos para una frecuencia de alimentación de 60 Hertz.

Tabla 2.3. Número de polos y velocidad de los motores

No. De polos	2	4	6	8	10	12
Velocidad en rpm	3600	1800	1200	900	720	600

Fuente: BUN-CA, 2008.

La razón para utilizar motores de menor velocidad es incrementar el torque o par que necesita entregar el motor.

2.6 SISTEMAS VIBRATORIOS

Se entiende por sistema vibratorio todo aquel que posee un movimiento oscilatorio que puede o no ser armónico y que tiene la capacidad de almacenar y transformar energía cinética y potencial.

2.6.1 TIPOS DE VIBRACIONES

a. Vibraciones libres:

Respuesta a condiciones iniciales (impulsos).

b. Vibraciones forzadas:

Respuesta armónica a una excitación periódica.

Respuesta transitoria.

c. Vibraciones auto excitadas:

Respuesta transitoria a una excitación interna debido en general a inestabilidades.

2.6.2 CONSTRUCCIÓN DE MODELOS

Una vez que un problema físico ha sido identificado, se comienza por desarrollar el modelo mecánico del mismo. Mediante la ayuda de las leyes de Newton o las ecuaciones de Lagrange, se obtiene el modelo matemático que corresponde al modelo mecánico. Con las herramientas matemáticas apropiadas, se halla la solución matemática al problema planteado y por

ende se consigue la respuesta del sistema propuesto en el modelo mecánico, que corresponde a la ley de movimiento (T.A.V. Multimedia, 2009).

Un ejemplo de lo anterior se presenta en la Figura 2.16.

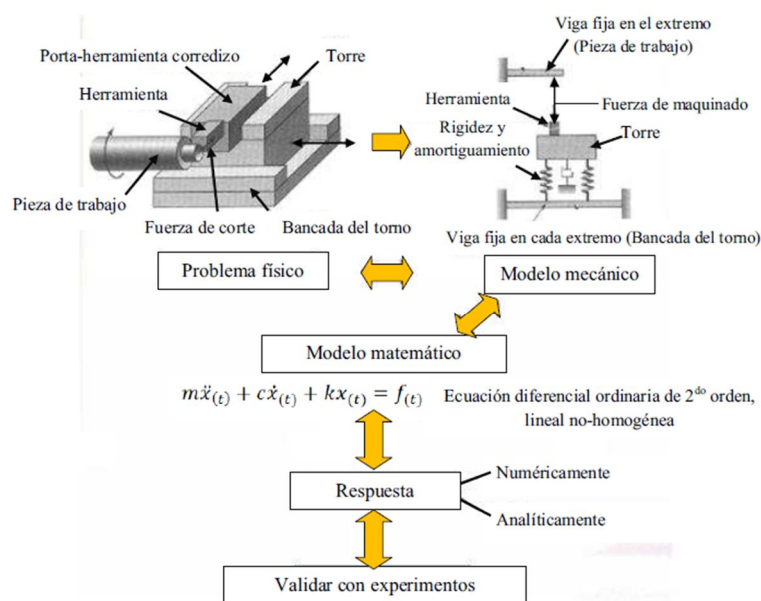


Figura 2.16 Sistema para tornear una pieza, modelos vibratorios y pasos para resolución del sistema

Fuente: (T.A.V. Multimedia, 2009)

2.6.3 RESONANCIA

La resonancia es un estado de operación en el que una frecuencia de excitación se encuentra cerca de una frecuencia natural del sistema mecánico, produciéndose en este caso un incremento progresivo de la amplitud de la vibración que puede llegar a ser peligroso para la integridad del sistema.

2.6.4 SISTEMAS DE 1 GDL

Un sistema mecánico se dice que posee un grado de libertad cuando su configuración geométrica puede ser expresada en cualquier instante en función de una sola variable. El modelo mecánico más simple de un solo GDL, es el masa-resorte-amortiguador identificado mediante sus constantes características equivalentes k , c , m , como se ilustra en la Figura 2.17, donde x es el desplazamiento del bloque respecto a la posición de equilibrio y F representa la acción de una fuerza externa.

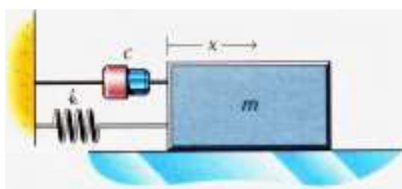


Figura 2.17 Constantes características de un sistema de 1 GDL

Fuente: (T.A.V. Multimedia, 2009)

Resolviendo el sistema ya sea por Newton o por Lagrange se obtiene la siguiente ecuación de movimiento:

$$2.4$$

2.6.5 RESPUESTA LIBRE

La respuesta libre de sistemas de un grado de libertad, ocurre cuando dichos sistemas son capaces de oscilar debido a la acción de fuerzas inherentes a ellos, sin la acción de fuerzas externas sobre estos, así la ecuación 2.4 se iguala a cero.

$$2.5$$

Para resolver la ecuación de movimiento se emplea la frecuencia natural (ω_n) y el factor de amortiguación (ζ).

Frecuencia natural (W_n)

Todo cuerpo posee masa y rigidez, en vibraciones es bien conocido que la frecuencia natural de un sistema es la raíz del cociente de la rigidez equivalente y la masa equivalente

$$W_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} \quad 2.6$$

Factor de amortiguación (ζ)

Relaciona las tres constantes características equivalentes del sistema. Se designa con el símbolo ζ , y es adimensional.

$$\zeta = \frac{c_{eq}}{2\sqrt{m_{eq} * k_{eq}}} \quad 2.7$$

Quedando la ecuación 2.5

$$\ddot{x}_{(t)} + 2\zeta W_n \dot{x}_{(t)} + W_n^2 x_{(t)} = 0 \quad 2.8$$

Así, la ecuación permite identificar cuatro tipos de sistemas de acuerdo a su factor de amortiguación

Sistema no amortiguado ($\zeta = 0$)

Este sistema es también llamado movimiento armónico simple, Estos sistemas son reducidos a una masa y un resorte (el primero es un almacenador de energía cinética, el segundo de energía potencial). Al no haber elementos disipativos, la respuesta es periódica y perpetua, ver Figura 2.18.

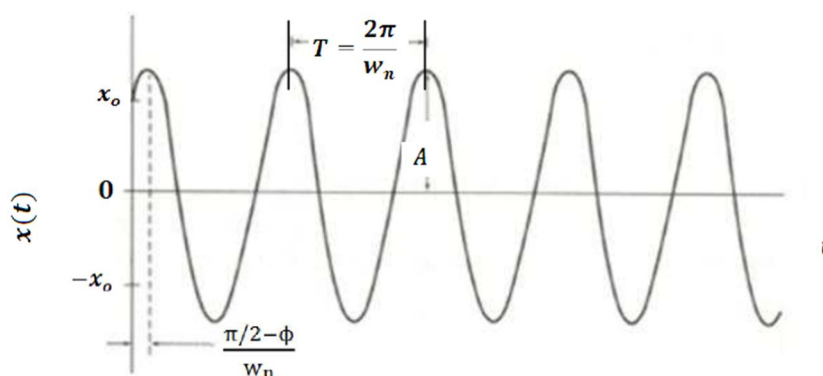


Figura 2.18 Respuesta libre de un sistema no amortiguado de 1 GDL

Fuente: (T.A.V. Multimedia, 2009)

Sistema sub-amortiguado ($0 < \zeta < 1$)

En este caso se presentará un movimiento oscilatorio armónico alrededor de una posición de equilibrio en el cual la amplitud disminuirá con el tiempo en cada oscilación, (ver Figura 2.19)

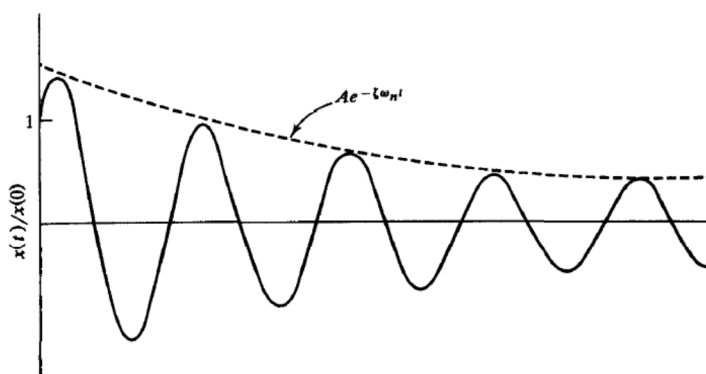


Figura 2.19 Respuesta libre de un sistema sub-amortiguado de 1 GDL

Fuente: (T.A.V. Multimedia, 2009)

Sistema críticamente amortiguado ($\zeta = 1$)

La condición $\zeta = 1$ define la cantidad mínima de amortiguamiento necesario para evitar un comportamiento oscilatorio, por lo cual se le llama a este caso críticamente amortiguado (ver Figura 2.20).

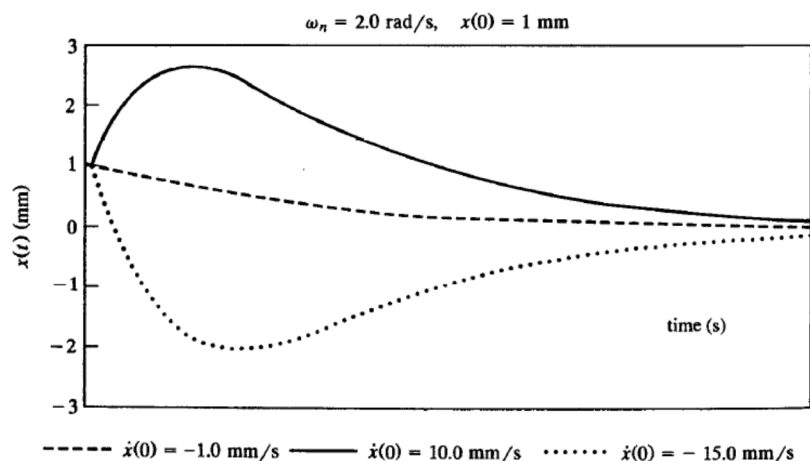


Figura 2.20 Respuesta libre de un sistema críticamente amortiguado de 1 GDL

Fuente: (T.A.V. Multimedia, 2009)

Sistema sobre-amortiguados ($\zeta > 1$)

Cuando es mayor que uno el sistema se acercará a su posición de equilibrio en forma exponencial sin que se presente oscilación alguna y jamás regresará a su posición original (a partir de la cual se produjo el movimiento) como se puede ver en la Figura 2.21. Ejemplos de este tipo de amortiguamiento pueden observarse en los mecanismos que sirven para el cerrado automático de puertas.

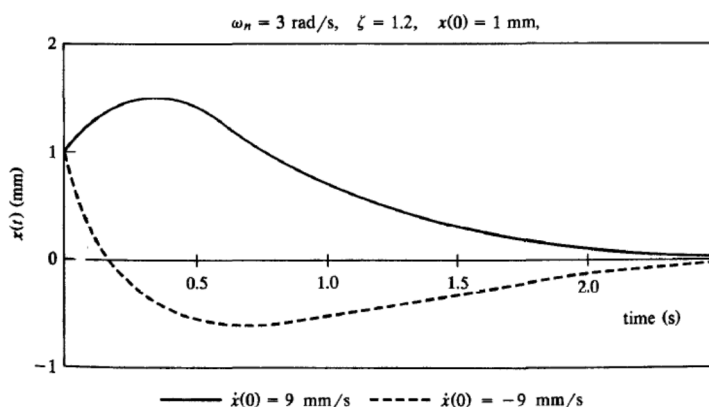


Figura 2.21 Respuesta libre de un sistema sobre-amortiguado de 1 GDL

Fuente: (T.A.V. Multimedia, 2009)

2.6.6 VIBRACIONES TORSIONAL

La Figura 2.22 muestra un disco que tiene un momento polar de inercia de masa I_0 , montado en uno de los extremos de una flecha cilíndrica sólida que esta fija en el otro extremo.

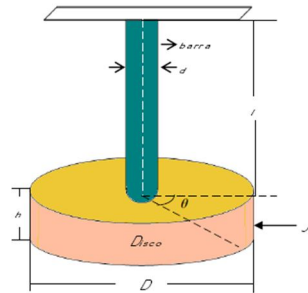


Figura 2.22 Péndulo de Torsión

Fuente: (T.A.V. Multimedia, 2009)

Si la rotación angular del disco sobre el eje es θ (así como la torsión del eje), G es el modulo de cortante, l es el largo del eje y, τ es el torque que produce la torsión θ .

Se tiene de la teoría de torsión de ejes circulares que:

$$\tau = \frac{GI_0}{l} \theta \quad 2.9$$

donde:

$$I_0 = \frac{\pi d^4}{32} \quad 2.10$$

El eje provee un torque de retorno de magnitud. De esta manera el eje actúa como resorte torsional con una constante de rigidez torsional (k_t):

$$k_t = \frac{GI_0}{l} \quad 2.11$$

Derivando la ecuación del movimiento angular del disco sobre su eje y usando la segunda ley de movimiento de Newton se obtiene:

$$J_o\ddot{\theta} + k_t\theta = 0 \quad 2.12$$

La frecuencia natural del sistema es:

$$w_n = \sqrt{\frac{k_t}{J_o}} \quad 2.13$$

2.6.7 VIBRACIÓN FORZADA

La respuesta forzada, ocurre cuando dicho sistema oscila debido a la acción de fuerzas externas que lo excitan. Cuando la excitación es de tipo oscilatorio, el sistema tiende a vibrar de la misma manera y con la misma frecuencia, es decir, que la respuesta del sistema estará en función de la frecuencia de excitación.

Una característica fundamental de los sistemas excitados por fuerzas externas es que su respuesta está conformada por un estado transitorio y un estado permanente (ver Figura 2.23).

El transitorio se debe a la acción conjunta de la respuesta libre y la respuesta forzada, pero debido a que la respuesta libre es decreciente en el tiempo, después de alcanzado un cierto tiempo la respuesta del sistema estará únicamente dada en función de la respuesta forzada.

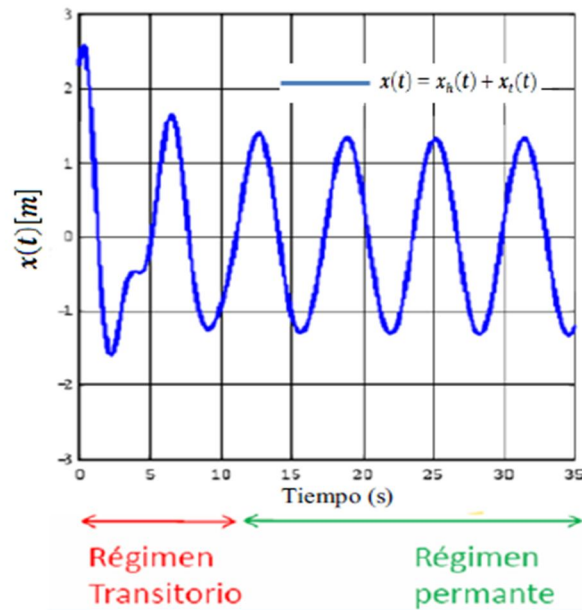


Figura 2.23 Respuesta forzada estado transitorio y permanente
Fuente: (T.A.V. Multimedia, 2009)

Existen diversos tipos de excitación como lo son:

Periódicas

- Armónica simple (desbalance, desalineación, soltura, entre otros)
- Armónicas complejas (vibraciones acústicas, flujo pulsante, entre otros)

No periódicas

- Transitorias (arranque o parada de un equipo, pérdida de un alabe)
- Impulsivas (válvula de alivio, golpe de ariete, choques, flujo tapón, entre otros)
- Excitaciones aleatorias
 - Estacionarias (estadística no-tiempo)
 - No estacionarias (ola, viento, sismos)(estadística depende del tiempo)

Además de las definiciones dadas para los sistemas vibrantes sin excitación externa (libres), en los sistemas forzados se hace necesario definir otras variables para el análisis de los mismos.

La amplitud de vibración forzada se designa con el símbolo “X” y es la amplitud de la respuesta forzada.

$$X = \frac{F_0}{m \cdot \omega_n} \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad 2.14$$

La relación de frecuencias asocia la frecuencia natural del sistema con la frecuencia de excitación. Se designa con el símbolo “r” es adimensional y se expresa según la ecuación:

$$r = \frac{\Omega}{\omega_n} \quad 2.15$$

Donde “Ω” es la frecuencia de excitación. Un sistema de 1 GDL entra en resonancia cuando $r=1$.

El factor de amplificación dinámica se designa con el símbolo “K” , es adimensional y puede ser interpretado como el cociente de la amplitud de la respuesta forzada y la amplitud de la frecuencia de excitación. Se expresa por:

$$K = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad 2.16$$

El retraso de fase se designa con el símbolo “φ” y se expresa en grados o radianes. Se expresa según la ecuación:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2\zeta r}{1-r^2} \right) \quad 2.17$$

En el estudio de vibraciones forzadas son muy útiles los gráficos de factor de amplificación dinámico y retraso de fase vs. relación de frecuencias, ver Figura 2.24.

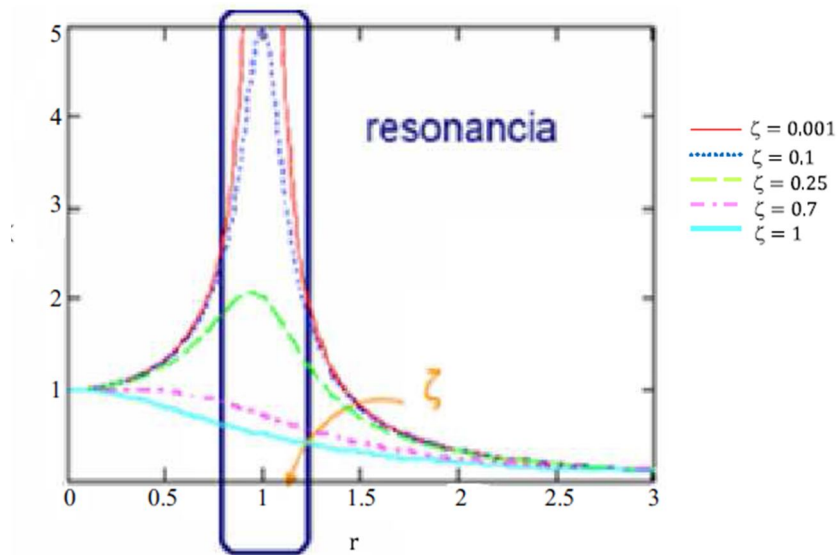


Figura 2.24 Factor de amplificación vs relación de frecuencias para diferentes constantes de amortiguación

Fuente: (T.A.V. Multimedia, 2009)

CAPITULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA MAGNETOREOLÓGICO

Para realiza el diseño del sistema magnetoreológico, se lo debe hacer analizando tres líneas específicas:

- a. Análisis del Fluido magnetoreológico (FMR)
- b. Diseño de los elementos mecánicos que constituyen el amortiguador magnetoreológico.
- c. Diseño del sistema eléctrico para el amortiguador magnetoreológico.

Para cada uno de estos lineamientos se realizara un análisis y se tomará las consideraciones necesarias, a fin de alcanzar con el objetivo planteado.

3.1 ANÁLISIS DEL FLUIDO MAGNETOREOLÓGICO

3.1.1 PARÁMETROS DEL FLUIDO MAGNETOREOLÓGICO

Las propiedades reológicas de los fluidos controlables son dependientes de la concentración y densidad de las partículas, de la distribución de forma y tamaño de las partículas, de las propiedades del fluido portador, de aditivos adicionales, del campo aplicado, de la temperatura y de otros factores. Los principales parámetros que definen un fluido magnetoreológico (FMR) son:

3.1.1.1 La naturaleza de las partículas

Para un fluido magnetoreológico se requiere partículas que sean magnetizables, es decir, que respondan ante la aplicación de un campo magnético y que se las pueda encontrar con facilidad en el mercado; para esto se analiza brevemente los materiales ferromagnéticos, debido a las características que estos poseen.

Los materiales ferromagnéticos, compuestos de hierro y sus aleaciones con cobalto, tungsteno, níquel, aluminio y otros metales, son los materiales magnéticos más comunes y se utilizan para el diseño y constitución de núcleos de los transformadores y máquinas eléctricas. Los materiales ferromagnéticos poseen las siguientes propiedades y características que se detallan a continuación.

- Aparece una gran inducción magnética al aplicarle un campo magnético.
- Permiten concentrar con facilidad líneas de campo magnético, acumulando densidad de flujo magnético elevado.
- Se utilizan estos materiales para delimitar y dirigir a los campos magnéticos en trayectorias bien definidas.

3.1.1.2 La concentración de las partículas

La concentración de las partículas es un parámetro que determina el funcionamiento y alcance de un fluido magnetoreológico, pues a medida que aumenta la concentración de partículas, aumenta la capacidad magnética, la densidad y la viscosidad de un fluido magnetoreológico; además la

concentración de las partículas influye en el porcentaje de sedimentación que puede producirse, es decir, a una mayor concentración puede existir un mayor porcentaje de sedimentación, dependiendo también del fluido que se utilice.

Por lo tanto, se decide utilizar diferentes concentraciones para el FMR en un rango determinado desde 0, 10, 20, 30 hasta un 40% de partículas de acero, estos valores son tomados como referencia de un estudio realizado por Lord Corporation. Esta concentración se toma a partir del volumen o el peso del fluido que se decida utilizar.

3.1.1.3 La densidad de las partículas

La densidad de las partículas del material ferromagnético, en este caso, partículas de acero, influyen en la suspensión de estas en el fluido y en el porcentaje de sedimentación que puede producirse.

3.1.1.4 El tamaño y la distribución de las partículas

El tamaño y la distribución de las partículas, determinan la calidad del fluido magnetoreológico, por lo tanto se requiere que las partículas sean lo más homogéneas posibles para asegurar la suspensión y dispersión de estas en el fluido y que se evite las aglomeraciones de las partículas. El tamaño de las partículas debe estar en un rango de 20 a 200 micras (Iyer, 2012), para obtener un fluido magnetoreológico adecuado.

3.1.1.5 La naturaleza del fluido portador

Las partículas son suspendidas generalmente en aceite mineral, aceite sintético, etc. Los aceites hidrocarburos son preferidos porque son muy buenos lubricantes, durables, estables y se encuentran fácilmente en el mercado, además permiten que las partículas de acero se mantengan protegidas de la oxidación o reducción producida por los impactos de estas con los componentes mecánicos del amortiguador.

3.1.1.6 La densidad del fluido portador

La densidad del fluido determina la suspensión de las partículas en el mismo, así también como la concentración que se vaya a utilizar.

A medida que se tenga una mayor densidad se podrá realizar una mejor suspensión y en una mayor concentración de partículas de acero.

3.1.1.7 La viscosidad del fluido portador

La viscosidad en el fluido es una de las más importantes características en un aceite y por lo tanto en el fluido magnetoreológico, es por eso conveniente que el fluido a utilizar sea de una viscosidad baja entre la gama de las que podemos escoger comercialmente, para luego aumentar su viscosidad variando el campo magnético aplicado. La viscosidad además se relaciona directamente con el coeficiente de amortiguamiento del sistema.

3.1.1.8 Los aditivos adicionales

Se utiliza aditivos a fin de que las partículas de acero se mantengan en suspensión y no se sedimenten rápidamente, ya que el factor sedimentación

no se lo puede evitar pero al menos se contrarrestarán sus efectos negativos dentro del amortiguador. Además de proveer durabilidad y resistencia a la corrosión.

3.1.2 OBTENCIÓN DEL FLUIDO MAGNETOREOLÓGICO

Un fluido MR básico debe tener algunas características: partículas magnéticamente polarizables, un líquido portador y en el caso de ser necesario, el uso de aditivos estabilizadores.

3.1.2.1. Selección del material

El primer paso es seleccionar un material que tenga una gran inducción magnética, para lo cual se determinó utilizar partículas de acero. El acero es una de las aleaciones más utilizadas en el mercado, que tiene un bajo costo y posee propiedades ferromagnéticas.

3.1.2.2. Recolección de partículas

Para obtener partículas de acero nos valemos de muchos procesos y métodos, siendo los más comunes los procesos con arranque de viruta, ya que se obtienen en las máquinas herramientas como torno, fresadora, taladro, etc. Dependiendo del proceso y la máquina se pueden tener diversos tamaños y formas de estas virutas o limallas, ajustando nuestras necesidades a lo que podemos obtener en nuestro medio.

Para este proyecto se ha utilizado el arranque de viruta que es obtenida del proceso de rectificar discos en la máquina rectificadora plana (figura 3.1), del departamento de Máquinas y Herramientas en la Fábrica de Municiones Santa Bárbara, localizado en la Av. General Rumiñahui, junto a la ESPE,

Sangolquí, Pichincha. La limalla de acero recolectada es bastante pequeña, conveniente para nuestra aplicación.



Figura 3.1 Máquina rectificadora plana

Fuente: Propia de los autores

Se debe obtener la mayor cantidad de limalla de acero posible como se muestra en la figura 3.2, para realizar todos los experimentos y pruebas necesarias sin tener que volver a recolectarlos y secarlos nuevamente.



Figura 3.2 Limallas de acero obtenido de la máquina rectificadora plana

Fuente: Propia de los autores

Una vez reunida la mayor cantidad de limallas de acero, se realiza un secado a temperatura ambiente, ya que las partículas salen mojadas del

proceso de rectificado, debido a la constante refrigeración que tiene esta máquina.

3.1.2.3. Primer procesamiento de las partículas

a) Secado

Un consejo para el secado, es poner las limallas sobre papel absorbente o como en este caso se utiliza papel periódico como se muestra en la Figura 3.3 el objetivo es acelerar dicho proceso.

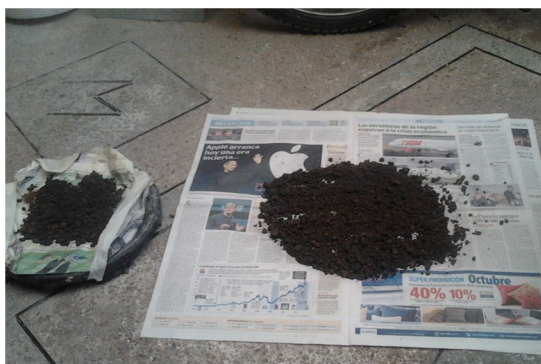


Figura 3.3 Secado de las limallas

Fuente: Propia de los autores

Por otro lado se debe evitar que se formen volúmenes grandes compactados de viruta; esto nos evitará molestias en el momento de hacer el filtrado, ya que si realizamos esto al momento del secado será mucho más fácil hacer pasar la limalla por los filtros, además se debe tener especial cuidado con el secado por que las limallas al ser material ferroso tienden a oxidarse con el paso del tiempo.

Las características de las partículas que se recolectan de este proceso no son adecuadas todavía para la obtención del FMR debido a que:

- El tamaño de las partículas es demasiado grande
- Las partículas se hallan agrupadas en pequeñas aglomeraciones.

- Al ser partículas obtenidas de una máquina herramienta de tipo comercial éstas se hallan mezcladas con diversos materiales magnéticos y no magnéticos.

b) Pulverizado

Por lo tanto se procede a realizar el pulverizado de estas virutas, para esto utilizamos un cilindro pequeño de acero como elemento golpeador para moler los pedazos que se forman durante el proceso de secado y una mesa con una superficie de vidrio lisa como se muestra en la figura 3.4, con el fin de obtener limallas más pequeñas, hasta alcanzar una consistencia muy fina. La figura 3.5 muestra este proceso.



Figura 3.4 Cilindro de acero y mesa con superficie de vidrio

Fuente: Propia de los autores



Figura 3.5 Pulverizado de las limallas

Fuente: Propia de los autores

c) Primer Filtrado

Una vez pulverizadas las limallas, lo siguiente es filtrar o cernir las partículas para obtenerlas de un tamaño homogéneo para la aplicación y así conseguir una buena calidad del fluido, para esto utilizamos una tela de cortina muy fina que permita pasar las limallas de menor tamaño.

Todo este proceso es tedioso, porque se lo realiza en pocas cantidades, pero, se debe ser lo más minucioso posible, ya que de este paso depende el éxito en la obtención de un fluido MR de calidad. En la figura 3.6 se muestra el proceso de filtrado.

Aproximadamente se obtiene un 60% de limalla útil.



Figura 3.6 Filtrado de las limallas

Fuente: Propia de los autores

d) Primer Análisis

Las partículas obtenidas del primer proceso de filtrado fueron llevadas al Laboratorio de Biotecnología de la ESPE (centro de microscopía electrónica) para conocer su forma y tamaño. Se utilizaron dos microscopios de diferentes características para realizar este propósito, como se describe a continuación.

Estereomicroscopio (figura 3.7):



Figura 3.7 Estereomicroscopio

Fuente: Propia de los autores

Código ESPE: 04-4761-03-00099

Código CEM: R-CME-0012

Equipo: Estereomicroscopio

Marca: Olympus

Modelo: SZ2-1LST

Número de serie: 8 J17679

Voltaje de operación: 110V

Descripción del equipo: Observación en 3D de microestructuras

Año de compra: 2008

Vida útil del equipo: 5 años

Área: Centro microscopía electrónica

Primero se utilizó el esteromicroscopio para la observación en 3D de las partículas metálicas, siguiendo los pasos que se muestran en el instructivo de uso del equipo:

- 1) Conectar el equipo
- 2) Encender el equipo
- 3) Colocar la muestra en la base del equipo

- 4) Adaptar la cámara digital al lente del microscopio, ajustando (figura 3.8)



Figura 3.8 Adaptación de cámara digital al microscopio

Fuente: Propia de los autores

- 5) Tomar fotos de la muestra
- 6) Ajuste la cobertura de los oculares, de acuerdo a la forma y tamaño de su cara
- 7) Acercarse o alejarse de la muestra utilizando el macrométrico para ajuste de la imagen
- 8) Una vez terminada la observación apagar el equipo
- 9) Quitar la muestra

A continuación en la figura 3.9, podemos observar las fotografías tomadas, donde se muestra su forma a una ampliación de 4X.

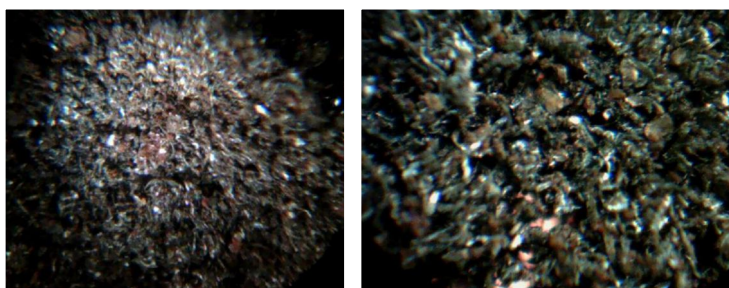


Figura 3.9 Partículas metálicas primer filtro 4X

Fuente: Propia de los autores

Se puede observar de una manera muy superficial a las partículas, las cuales se encuentran aglomeradas. Por lo tanto se utilizó un microscopio de mayor alcance donde se pueda apreciar de mejor manera a la partícula de acero.

Microscopio óptico (figura 3.10):



Figura 3.10 Microscopio óptico

Fuente: Propia de los autores

Código ESPE: 04-4761-07-00100

Código CEM: R-CME-0011

Equipo: Microscopio óptico

Marca: Olympus

Modelo: CX31

Número de serie: 7B1772

Voltaje de operación: 110V

Descripción del equipo: Observación de microorganismos o microestructuras

Año de compra: 2008

Vida útil del equipo: 5 años

Área: Centro microscopía electrónica

Se utilizó el microscopio óptico para la observación de las partículas metálicas a 10X, siguiendo los pasos que se muestran en el instructivo de uso del equipo:

- 1) Conectar el equipo
- 2) Encender el microscopio con el switch de la parte posterior del equipo.
 - a. Regular la intensidad de la luz con la perilla que se encuentra debajo del botón de encendido.
 - b. Usar el diafragma para ajustar el diámetro del campo del iris con respecto al poder del objetivo.
- 3) Colocar la placa que se va a observar en la platina.
- 4) Colocar el lente de 10X y separar al máximo el objetivo de la muestra.
- 5) Ajustar la abertura de los oculares con respecto a sus ojos
- 6) Adaptar la cámara digital al lente del microscopio, ajustando.
- 7) Lentamente acercarse hacia la muestra con el movimiento lento del tornillo macrométrico hasta visualizar el objetivo que se desee.
- 8) Enfocar con el tornillo macro y micrométrico hasta observar la muestra.
- 9) Una vez enfado, arreglar el enfoque con el movimiento lento del tornillo micrométrico.
- 10) Terminada la observación, separar lentamente el objetivo de la muestra.

- 11) Retirar la muestra y guardarla hasta una próxima observación.
- 12) Apagar el equipo.

A continuación en la figura 3.11, podemos observar las fotografías tomadas, donde se muestra su forma a una ampliación de 10X.

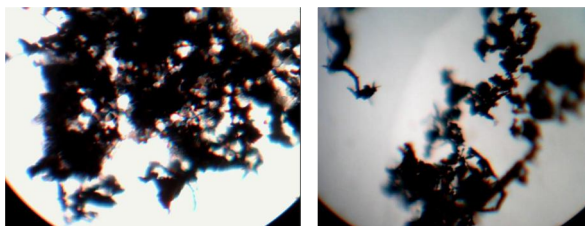


Figura 3.11 Partículas metálicas primer filtrado 10X

Fuente: Propia de los autores

Se puede observar que la partícula aún es grande, y se encuentra formando pequeñas agrupaciones, además existen rastros de partículas que no se lograron retirar en el pre procesamiento de las partículas de acero.

3.1.2.4. Segundo Procesamiento de las partículas

Para obtener partículas de un menor tamaño es necesario realizar un tamizado más fino, para lo cual se utilizó malla de nylon como se observa en la figura 3.12, obteniendo como resultado partículas más finas.



Figura 3.12 Segundo filtrado

Fuente: Propia de los autores

a) Calcinación

Es necesario realizar una calcinación en un horno de mufla a fin de eliminar los residuos orgánicos y demás partículas que se encontraban mezcladas en la muestra, para posterior realizar una granulometría y obtener una apreciación de las dimensiones de las partículas.

Este proceso se refiere a la determinación de las partículas en una mufla a temperaturas que oscilan entre 500 y 600°C. El agua y sustancias volátiles son evaporadas, mientras que las sustancias orgánicas son incineradas en presencia del oxígeno del aire para producir CO₂ y óxido de nitrógeno.

Los elementos tales como: Fe, Se, Pb y As, pueden volatilizarse parcialmente con este procedimiento, Se requiere de una pequeña atención sólo para evitar la formación de llamas y ello se logra subiendo la temperatura lentamente hasta aproximadamente 200°C. Después que se ha quemado la materia orgánica, se continua subiendo la temperatura hasta aproximadamente 500°C. Requiriendo un largo tiempo para la incineración (12-18 horas o toda la noche).

b) Granulometría

Los ensayos de granulometría tienen por finalidad determinar en forma cuantitativa la distribución de las partículas de acero de acuerdo a su tamaño. La distribución de las partículas se determina mediante tamizado, con una serie de mallas normalizadas en fracciones granulométricas de tamaño decreciente hasta un tamaño de 0.038 mm

Este ensayo de granulometría se realizó en la Escuela Politécnica Nacional en el departamento de Metalurgia Extractiva. Este departamento posee los siguientes instrumentos y equipos necesarios para realizar este ensayo:

- Balanza de precisión $\pm 0,1$ %.
- Tamizador ATM; ARROW USA.; 1/4 DE Hp, 115 V, motor Leeson.
- Tamiz vibrador; construcción Local
- Juegos de tamices 34 Tamices

Tamices

Se tiene tamices circulares para áridos de la norma ASTM de ocho pulgadas (20,3 cm) de diámetro, que son los más comúnmente utilizados (figura 3.13). El término 'áridos' se refiere a que están diseñados para la separación de partículas secas, aunque se pueden utilizar con suspensiones de sólidos en agua (Filtra Vibración S.L., 2012).



Figura 3.13 Tamices

Fuente: (Filtra Vibración S.L., 2012)

Tamaño de luz de la malla

Se entiende por luz de malla la distancia del lado de cada cuadrado libre que forma el tejido de una malla cuadrada, o el diámetro de los orificios de una plancha cribada con agujeros circulares.

Se necesitan dos parámetros para definir una malla; uno es la luz de malla y la otra la superficie abierta, que se mide como la proporción de la superficie total de la malla que queda libre, o sea que no forma parte de la estructura de hilos o alambres (figura 3.14).

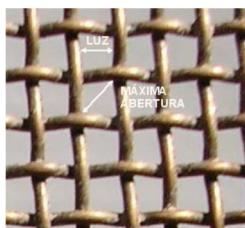


Figura 3.14 Malla

Fuente: (Filtra Vibración S.L., 2012)

Selección del tamiz

Para poder elegir el tamiz necesario se da a continuación la tabla 3.1, que correlaciona los números de mesh y la apertura de malla en tres sistemas distintos de normas utilizados internacionalmente.

Tabla 3.1 Comparación de Aperturas de Tamices de Malla Metálica y Chapa. Según normas standards: ISO 3310-1, 3310-2, ASTM E11, E323, UNE 7050-3, 7050-4

ISO/UNE (mm)	ASTM (#)		ISO/UNE (mm)	ASTM (#)
2,36	Nº 8		0,224	-
2,24	-		0,212	Nº 70
2	Nº 10		0,200	-
1,80	-		0,180	Nº 80
1,70	Nº 12		0,160	-
1,60	-		0,150	Nº 100
1,40	Nº 14		0,140	-
1,25	-		0,125	Nº 120
1,18	Nº 16		0,112	-
1,12	-		0,106	Nº 140
1	Nº 18		0,100	-
0,900	-		0,090	Nº 170
0,850	Nº 20		0,080	-
0,800	-		0,075	Nº 200
0,710	Nº 25		0,071	-
0,630	-		0,063	Nº 230
0,600	Nº 30		0,056	-
0,560	-		0,053	Nº 270
0,500	Nº 35		0,050	-
0,450	-		0,045	Nº 325
0,425	Nº 40		0,040	-
0,400	-		0,038	Nº 400
0,355	Nº 45		0,036	-
0,315	-		0,032	Nº 450
0,300	Nº 50		0,025	Nº 500
0,280	-		0,020	Nº 635
0,250	Nº 60			

Fuente:

<http://www.filtracom.com/Descargas/Luces%20tamices%20malla%20chapa.pdf>
Resultados

Se realizó la granulometría con 4 muestras de 250 gr de partículas metálicas, utilizando un conjunto de 14 tamices, a partir de la malla # 20, que tiene una abertura de 850 um, hasta la malla # 400, con una abertura de 38 um. Obteniendo los resultados que se pueden observar en el anexo A-3.1.

Se obtuvieron de esta manera un 67% del total de las muestras, equivalente a 670 gr de partículas de acero con tamaño de grano de hasta 106 um, siendo este un valor adecuado para un FMR.

3.1.2.5. Obtención del líquido portador

Existen diferentes aceites o fluidos que generalmente se utiliza para el llenado de los amortiguadores, en nuestro medio el más utilizado es el conocido aceite hidráulico que se le puede encontrar en distintas marcas.

Considerando los parámetros de un fluido magnetoreológico hemos seleccionado utilizar un lubricante cuya designación es SAE 20W-50. Este es un aceite de uso muy común y tiene una viscosidad baja, lo cual es adecuado para nuestro proyecto, que requiere un coeficiente de amortiguamiento bajo. La viscosidad de este tipo de aceite varía en diferentes rangos temperatura. Sin embargo a través de los métodos de determinación de viscosidad, podremos determinar la viscosidad a la temperatura ambiente, que es la temperatura de trabajo del sistema. En la tabla 3.2, se puede apreciar las características típicas del aceite que hemos seleccionado.

Tabla 3.2 Características típicas del aceite SAE 20W50

Grado SAE	20W-50
Numero de Producto	223397
Gravedad API	29,0
Viscosidad, Cinemática	
cst a 40 °C	157,8
cst a 100 °C	17,5
Índice de Viscosidad	119,0
Punto de Inflamación, °C(°F)	>205(401)
Punto de Ecurrimiento, °C(°F)	-24(-11)
Ceniza Sulfatada, wt %	0,9
Numero Base, ASTM D2896	8,5

Fosforo, wt %	0,077
Zinc, wt%	0,088
Magnesio, wt %	0,004

Fuente:[http://www.lubricantespremium.com/texaco/PDS%20HAVOLI
NE_PREMIUM_SAE_20W50.pdf](http://www.lubricantespremium.com/texaco/PDS%20HAVOLI%20NE_PREMIUM_SAE_20W50.pdf)

Después de realizar la primera prueba se comprobó que la viscosidad de este aceite es baja, es decir el aceite es liviano y es adecuado para aplicaciones que no requieren de un amortiguamiento muy rígido.

3.1.3 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE MEDICIÓN PARA LA VISCOSIDAD

El objetivo de realizar las pruebas con el fluido magnetoreológico es determinar su viscosidad en las diferentes concentraciones que presenta y cuál es su comportamiento al momento de aplicar un campo magnético controlado. Para esto es necesario utilizar un equipo que nos permita medir la viscosidad, tomando en cuenta el tipo del fluido, el cual se encuentra mezclado con una concentración de partículas metálicas, y que además se aplicará un campo magnético controlado. Entre los equipos que posee el Laboratorio de Fluido de la Escuela Politécnica del Ejército se encuentra:

3.1.4.1 Viscosímetro de caída libre

Consiste en un recipiente que contiene un fluido viscoso. Se introduce una pequeña esfera como se muestra en la figura 3.15, la cual parte del reposo y rápidamente alcanza la velocidad límite.

Variables que intervienen:

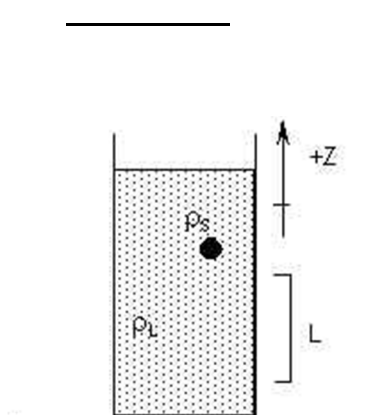
ρ_s : densidad de la esfera sólida

ρ_L : densidad del líquido

D: diámetro de la esfera

L: longitud que cae la esfera en un tiempo t

v_o : velocidad límite de la esfera ($v_o=L/t$)



3.1

Figura 3.15 Figura representativa del viscosímetro de caída libre

Fuente: Propia de los autores

3.1.4.2 Viscosímetro Saybolt

La facilidad con que un fluido fluye a través de un orificio de diámetro pequeño es una indicación de su viscosidad. Éste es el principio sobre el cual está basado el viscosímetro de Saybolt. Este viscosímetro (figura 3.16) está compuesto de un tubo cilíndrico de bronce el mismo que es rodeado por un baño a temperatura constante. Cuando la muestra en el tubo alcanza la temperatura de la prueba, se mide el tiempo requerido para que 60ml del líquido pasen a través del orificio. El fluido se recoge en un frasco estándar calibrado. La unidad de medida es el tiempo en segundos requeridos para que 60 ml del líquido fluya a través del orificio a una temperatura dada. Esta medida se conoce como segundos saybolt universal (SSU).



Figura 3.16 Viscosímetro de Saybolt

Fuente: Propia de los autores

Después de analizar las posibilidades de cada uno de estos equipos, no se logró cumplir con el objetivo de tener una medida de viscosidad para el fluido magnetoreológico debida a las siguientes condiciones funcionales:

- El viscosímetro de caída de bola, posee una bola de acero, la cual es afectada al momento de realizar una medida debido al campo magnético que es aplicado
- Tanto el viscosímetro de caída de bola como el de Saybolt, no presentan facilidad para colocar y/o aplicar un campo magnético

Por lo tanto es necesario utilizar un método que no sea afectado en su funcionalidad por el campo magnético, y que permita la facilidad de aplicar el electroimán que se diseñó para esta aplicación. Un método que se ajusta a estos requerimientos es el viscosímetro de Brookfield, que posee la Escuela Politécnica Nacional, en el Laboratorio de Química 1.

3.1.4.3 El viscosímetro Brookfield

Es uno de los viscosímetros rotacionales más usado en la industria. Es un aparato sencillo (ver figura 3.17) que permite medir la viscosidad de fluidos no newtonianos, aunque con ciertas limitaciones. Mide el momento

necesario para hacer girar un elemento, el husillo (“spindle”), en un fluido. Dicho husillo se mueve por medio de un motor síncrono a través de un muelle calibrado, cuya deflexión era indicada en los primeros modelos por una aguja que se movía en un dial circular.



Figura 3.17 Viscosímetro de Brookfield CANON

Fuente: Propia de los autores

En la actualidad, en los modelos digitales aparece el valor del momento de torsión, el esfuerzo de cizalla y la viscosidad como un número en la pantalla digital. Los dispositivos electrónicos internos realizan los cálculos automáticamente. Los modelos más sofisticados tienen conexión con un ordenador y el software permite el almacenamiento de los datos y la representación en tiempo real de la curva de flujo, entre otras cosas (Lucas, 2010).

Para una viscosidad dada, el arrastre viscoso, o resistencia al flujo (indicado por la torsión del muelle) es proporcional a la velocidad de rotación del husillo y al tamaño de éste (además de estar relacionado con su forma la cual observamos en la figura 3.18). Así, tenemos que:

- El mínimo intervalo de medida se obtiene utilizando el husillo mayor y la mayor velocidad.

- El máximo intervalo se obtiene con el husillo menor y la menor velocidad.

Los viscosímetros Brookfield tienen una precisión garantizada dentro del $\pm 1\%$ de la lectura máxima para cada combinación de husillo/velocidad. Este hecho afecta igualmente a la reproducibilidad de las medidas, que se considera con un margen del $\pm 0,2\%$. Así pues, las medidas serán más precisas cuando la lectura se aproxime más a ese posible valor máximo de lectura y no será recomendable trabajar por debajo del 10% de ese valor máximo (momento en que aparecerá en el viscosímetro la indicación de LOW).



Figura 3.18 Husillos para viscosímetro de Brookfield

Fuente: Propia de los autores

Al efectuar medidas con este viscosímetro, es muy común utilizar los husillos girando en la muestra contenida en un vaso de precipitados. Estas son medidas no reproducibles en otros viscosímetros diferentes, por lo que es necesario informar del cilindro y de la velocidad utilizada.

3.1.4 ENSAYOS DE MEDICIÓN DE VISCOSIDAD EN UN FLUIDO MAGNETOREOLÓGICO

3.1.4.1 Objetivos

- Determinar la viscosidad de 4 muestras de FMR con concentraciones de 10, 20, 30 y 40 % en peso de partículas metálicas.
- Determinar la variación de viscosidad producto de la aplicación de un campo magnético dentro del FMR, variando su voltaje de entrada desde 0, 2, 4, 6, 8, 10 y 12 v.

3.1.4.2 Materiales y Equipos

- Viscosímetro de Brockfield
- Balanza digital
- Multímetro
- Aceite SAE 20W 50
- Partículas metálicas
- Circuito electroimán
- Envases plásticos
- Vaso de precipitación
- Agitador
- Franela
- Materiales de limpieza

3.1.4.3 Procedimiento

1. Preparar el viscosímetro de Brookfield, armarlo asegurándose que se encuentre nivelado, para esto verificamos el medidor de nivel que posee en la parte superior.
2. Preparar la muestra de FMR, para lo cual se coloca en un vaso de precipitación el aceite SAE 20w50 como se muestra en la figura 3.19, el cual posee un peso específico de 0,908 gr/ml. El volumen de aceite debe superar los 700ml, ya que es necesario que la aguja (spindle) del viscosímetro este sumergido hasta el nivel marcado en el mismo.



Figura 3.19 Muestra de aceite

Fuente: Propia de los autores

3. A continuación se procede a medir en una balanza (figura 3.20) la cantidad de partículas metálicas, correspondiente al porcentaje de concentración en peso requerido obteniendo como resultados los valores de la tabla 3.3.



Figura 3.20 Pesaje de las muestras

Fuente: Propia de los autores

Tabla 3.3 Tabla de concentraciones en peso

% de concentración	Gr de partículas metálicas
10	63,5
20	127,1
30	190,7
40	254,2

Fuente: Propia de los autores

4. Una vez preparada la muestra de FMR, lo colocamos en el viscosímetro de Brookfield y procedemos a determinar el spindle y la velocidad a la que este debe girar, para obtener una medida de viscosidad correcta.
5. Colocamos el electroimán en el interior del vaso de precipitación asegurándonos que este se encuentre a una distancia apropiada de separación del spindle, para que la medición no se vea afectado por el campo magnético
6. Tomamos la medida de viscosidad de la muestra de FMR, variando el voltaje del electroimán en pasos de 0, 2, 4, 6, 8, 10 y 12 v.
7. Una vez realizado el ensayo, limpiamos el equipo y procedemos nuevamente con las demás muestras.

3.1.4.4 Desarrollo de Ensayos

Primer Ensayo

Se realizó un primer ensayo con una muestra de 700ml de FMR con una concentración del 5% en volumen de partículas metálicas como se observa en la figura 3.21. Este ensayo nos permitirá observar el comportamiento de

inmersión de las partículas metálicas dentro del aceite y determinar el spindle así también como la velocidad a la que este debe girar, para obtener una medida de viscosidad correcta.



Figura 3.21 Muestra de FMR al 5%

Fuente: Propia de los autores

Se utilizó el equipo con un spindle s64, y se hizo girar al motor a una velocidad de corte de 0,3 RPM, pero no se logró una estabilización de la medida.

Posteriormente se utilizó un spindle s63, que posee una mayor superficie de corte haciéndolo girar a una velocidad de corte de 10 RPM, logrando de esta manera una medida de 323 cp (Viscosidad en cent poises). Sin embargo esta medida no era reproducible y presentaba una variación en las mediciones de un ± 3 cp. Por lo cual era necesario cambiar la combinación spindle-velocidad.

Por lo tanto para garantizar las mediciones en los siguientes ensayos, se decidió utilizar un spindle s62 y hacer girar al motor con una velocidad de corte de 20 RPM, esto nos permitirá determinar con mayor precisión la variación de la viscosidad y obtener medidas reproducibles.

Se observó que esta muestra de FMR al 5% de concentración, presentó una sedimentación de una cantidad mínima de partículas después de haber

pasado un tiempo de reposo de 30 min. Se observa por tanto en la figura 3.22 que existe una capa de FMR mezclado y en la parte inferior una capa con acumulación de partículas.



Figura 3.22 Muestra de FMR al 5% en reposo

Fuente: Propia de los autores

Segundo Ensayo

Posteriormente se realiza otro ensayo con una muestra de FMR al 10% de concentración, utilizando el spindle s62 y haciendo girar al motor a 20 RPM.

Una vez realizado una primera medición, se sumerge el electroimán en la muestra de FMR como se observa en la figura 3.23, y se comienza a aplicar un voltaje el cual se va incrementando en paso de 2, 4, 6, 8, 10 y 12 voltios y tomamos las mediciones respectivas.



Figura 3.23 Electroimán sumergido en la muestra de FMR

Fuente: Propia de los autores

Es importante colocar al electroimán a una distancia adecuada del spindle. Se recomienda a una distancia entre 10 a 20 mm; no menor a 10 mm debido a que su movimiento giratorio es afectado por el campo magnético, causando así un error en las mediciones. Posteriormente se realiza los ensayos con las muestras de FMR 20, 30, 40 % de concentración.

Se observó también que esta muestra de FMR presentó una sedimentación creciente a medida que aumenta la concentración de partículas metálicas, esto después de haber pasado un tiempo de reposo de 30 min. Se observa por tanto en la figura 3.24, que la muestra de FMR al 10% de concentración forma una capa de aglomeración de partículas debido a la sedimentación, aproximadamente de un 5% del total de partículas colocadas en la muestra de FMR.



Figura 3.24 Muestra de FMR al 10% sedimentación

Fuente: Propia de los autores

3.1.4.5 Resultados

Tabla 3.4 Viscosidad dinámica vs voltaje, para el 10% de concentración

Concentración 10%							
Voltaje (V)	0	2	4	6	8	10	12
Viscosidad (cP)	440	443	446	453	461	465	471
Torque (%)	29,3	29,5	29,7	30,2	30,7	30,9	31,4

Fuente: Propia de los autores

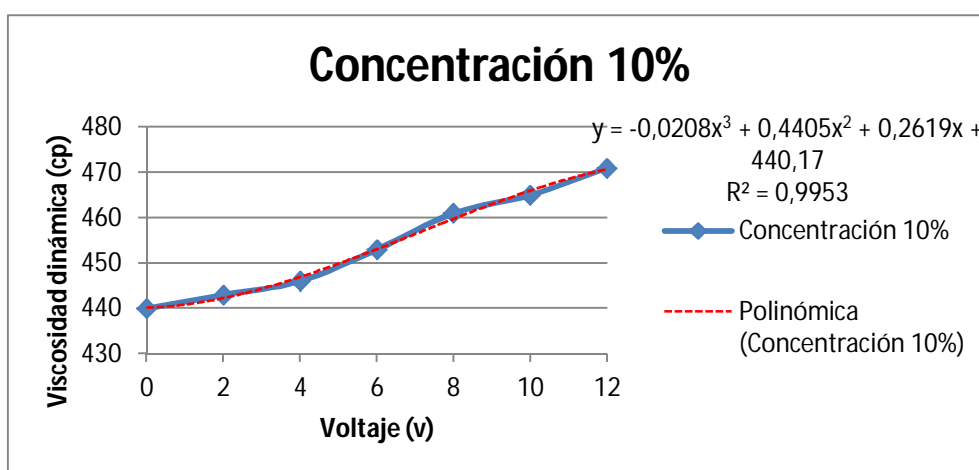


Figura 3.25 Viscosidad dinámica vs voltaje, para el 10% de concentración

Fuente: Propia de los autores

Tabla 3.5 Viscosidad dinámica vs voltaje, para el 20% de concentración

Concentración 20%							
Voltaje (V)	0	2	4	6	8	10	12
Viscosidad (cP)	447	449	453	459	470	476	482
Torque (%)	29,8	29,9	30,2	30,6	31,3	31,7	32

Fuente: Propia de los autores

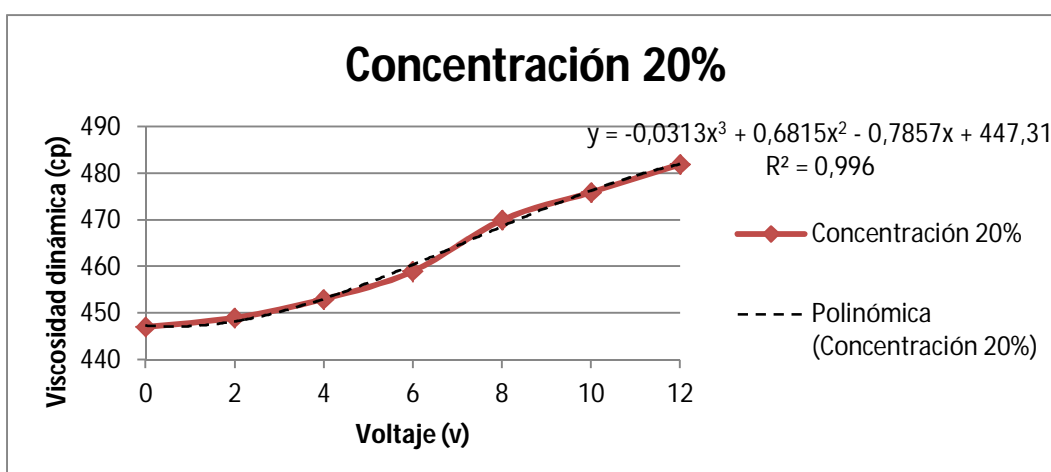


Figura 3.26 Viscosidad dinámica vs voltaje, para el 20% de concentración

Fuente: Propia de los autores

Tabla 3.6 Viscosidad dinámica vs voltaje, para el 30% de concentración

Concentración 30%							
Voltaje (V)	0	2	4	6	8	10	12
Viscosidad (cP)	459	461	465	471	488	495	500
Torque (%)	30,6	30,7	31	31,4	32,5	33	33,3

Fuente: Propia de los autores

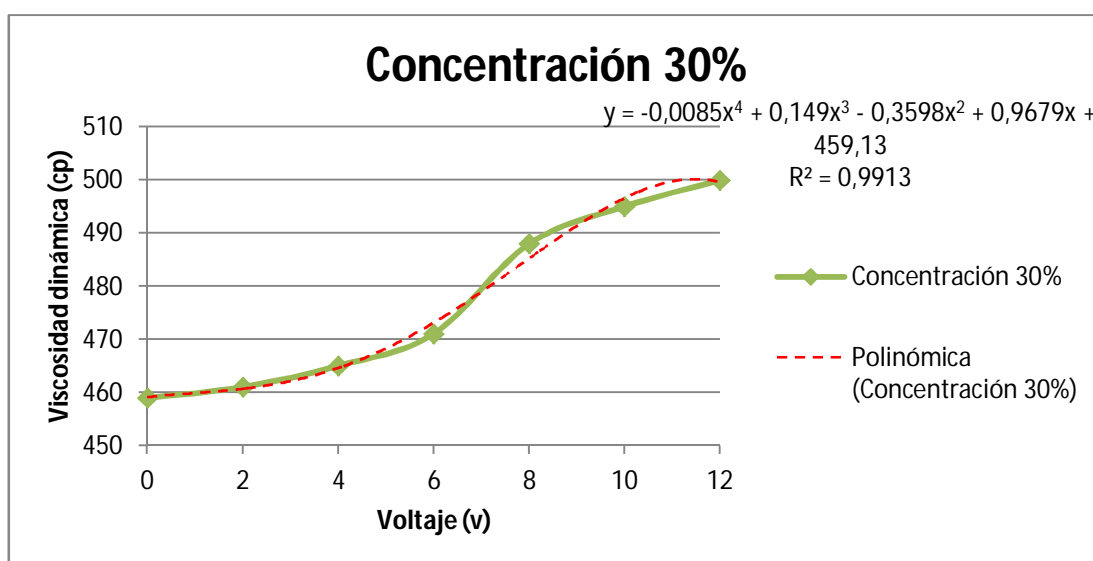


Figura 3.27 Viscosidad dinámica vs voltaje, para el 30% de concentración

Fuente: Propia de los autores

Tabla 3.7 Viscosidad dinámica vs voltaje, para el 40% de concentración

Concentración 40%							
Voltaje (V)	0	2	4	6	8	10	12
Viscosidad (cP)	489	492	498	506	519	531	536
Torque (%)	32,6	32,8	33,2	33,7	34,6	35,4	35,7

Fuente: Propia de los autores

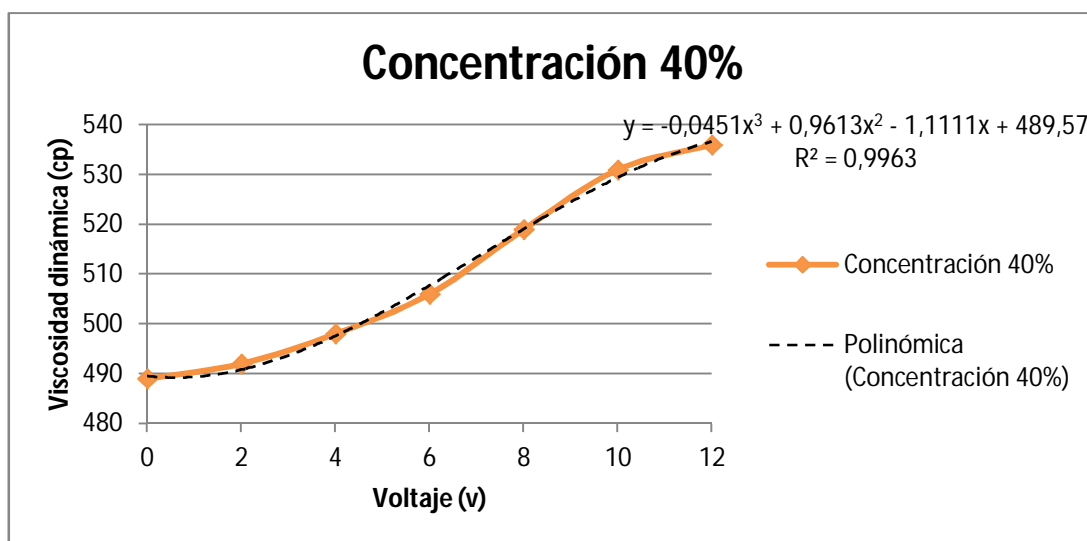


Figura 3.28 Viscosidad dinámica vs voltaje, para el 40% de concentración

Fuente: Propia de los autores

3.1.4.6 Conclusiones

- El aceite SAE 20W50, sin ninguna concentración de partículas metálicas, presenta un valor de viscosidad constante (313 Cp).
- Las características del FMR para cada concentración, varía en color, en solubilidad, en su porcentaje de sedimentación, y en la viscosidad que presenta inicialmente, es decir, antes de aplicar al FMR algún campo magnético. A medida que aumenta el porcentaje de concentración de partículas metálicas, aumenta su viscosidad inicial.
- Después de realizar las pruebas, se puede observar que existe una variación creciente y no lineal en la viscosidad. A medida que aumenta la concentración de partículas metálicas en el FMR, también existe un mayor rango de variación de la viscosidad.
- Las curvas viscosidad dinámica vs voltaje, de cada una de las concentraciones, presentan una tendencia similar, esto debido a que

se trata de un mismo liquido portador, con las partículas de un mismo elemento que posee características magnéticas como es el acero, y que se trabaja en los mismo rangos de voltaje. Esto se puede observar en la figura 3.29.

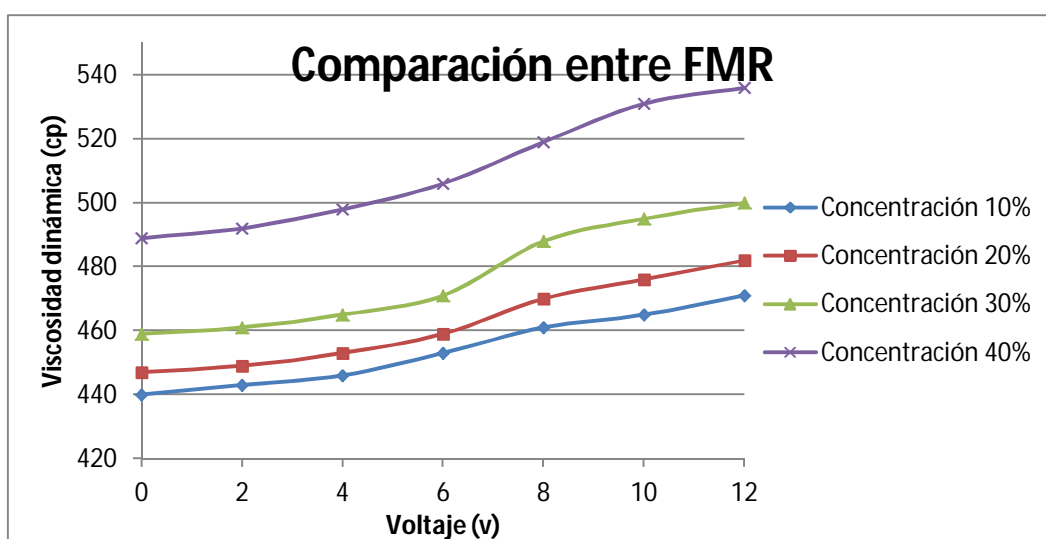


Figura 3.29 Viscosidad dinámica vs voltaje, comparación entre FMR

Fuente: Propia de los autores

- Las curvas de viscosidad dinámica vs voltaje, presentan una tendencia creciente polinómica, creciendo suavemente en el rango de 0 a 4v, luego crece rápidamente en el siguiente rango de 4 a 10v y finalmente crece suavemente hasta llegar a los 12v.
- Utilizando la regresión lineal de Excel, obtenemos las líneas de tendencia polinómica de cada una de las muestras de FMR, dando una línea de tendencia muy similar en cada una de estas muestras.

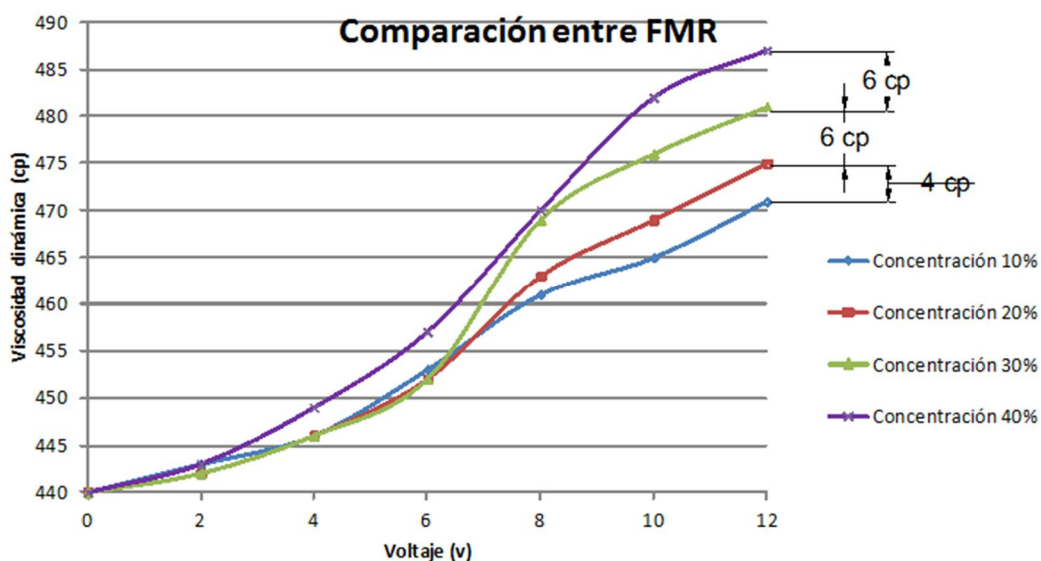


Figura 3.30 Viscosidad dinámica vs voltaje, regresión lineal

Fuente: Propia de los autores

Realizando la comparación entre cada una de las curvas correspondientes a las distintas muestras de FMR como se ve en la figura 3.30, aquí podemos ver que existe una diferencia de 4 a 6 cp en su rango de viscosidad, por lo tanto tomaremos como referencia para realizar las pruebas correspondientes en el sistema, a las muestras de FMR con una concentración del 10 y 20 % de partículas metálicas, debido a que:

- Presentan una tendencia similar al resto de muestras de FMR
- Su curva de viscosidad dinámica vs voltaje presenta un crecimiento suave y estable, lo que nos permite realizar el análisis
- Presentan un porcentaje de sedimentación bajo respecto a las muestras de 30 y 40 % de concentración
- Se obtuvo una línea de tendencia con una precisión aceptable
- Presentan una viscosidad inicial baja.

3.2 DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO

El diseño mecánico del amortiguador magnetoreológico parte de cumplir con tres requerimientos que tenemos. El primero; diseñar un amortiguador que permita el acoplamiento de un electroimán que se desplace en el interior del cilindro; segundo, que se pueda acoplar a la estructura metálica que se tiene; y tercero, que presente facilidad para utilizar diferentes fluidos magnetoreológicos. Para esto se realizará la adecuación de ciertos componentes mecánicos que posee un amortiguador comercial.

Para nuestro proyecto hemos obtenido un amortiguador estándar de motocicleta como se muestra en la figura 3.31; con una longitud de 350mm limitada por las dimensiones de la estructura metálica.



Figura 3.31 Amortiguador bitubo

Fuente: Propia de los autores

3.2.1 DESMONTAJE DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS DEL AMORTIGUADOR

Primero sacamos el resorte que se encuentra alrededor del cilindro por medio de una prensa ejerciendo la presión suficiente como indica la figura 3.32, y así proceder a abrir el cilindro.



Figura 3.32 Prensa para sacar resorte

Fuente: Propia de los autores

Una vez extraído el resorte procedemos a colocar el amortiguador en el torno y con una cuchilla de corte, se procede a cortar alrededor de la parte superior del cilindro, teniendo cuidado de no dañar el vástago del amortiguador. Debido a que el amortiguador está lleno de aceite hidráulico a presión, cuando ya esté cerca de cortarlo completamente el aceite fluirá con mucha presión, por lo que es necesario contar con un recipiente para recoger el fluido extraído del amortiguador. En la gráfica de la figura 3.33 se muestra este paso.



Figura 3.33 Corte de cilindro

Fuente: Propia de los autores

Posteriormente se procede a desmontar todos los componentes que posee el amortiguador, principalmente extraer el vástago con su respectivo émbolo y empaques los cuales se van a utilizar para el amortiguador magnetoreológico.

Es necesario además tomar las medidas de los componentes del amortiguador (cilindro, émbolo, vástago). En la figura 3.34 se puede observar los componentes del amortiguador. En las láminas del anexo A-6 se detallan los dibujos de conjunto y despiece con sus respectivas medidas.



Figura 3.34 Componentes del amortiguador

Fuente: Propia de los autores

3.2.2 ADAPTACIÓN DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS DEL AMORTIGUADOR

Primeramente se debe identificar los componentes en los cuales se van a realizar alguna modificación, a fin de que cumpla con los requerimientos deseados. Además se debe considerar las limitantes físicas que se presentan en el diseño, es decir el espacio o el volumen que deben ocupar

dentro del amortiguador, tanto el electroimán como los demás componentes asociados al funcionamiento. Estas medidas están sujetas a las dimensiones, que disponen cada uno de los componentes que se adaptaran de un amortiguador convencional.

3.2.2.1 Vástago

El vástago (figura 3.35) es un elemento mecánico móvil, en donde se colocarán los demás componentes del electroimán, este elemento transmite el movimiento y las cargas que recibe el amortiguador, y al desplazarse verticalmente dentro del FMR, permite que se produzca el efecto de amortiguamiento. Además el vástago actúa como núcleo del electroimán, lo cual resulta conveniente, ya que está hecho de acero, que es un material ferromagnético, y al tener una sección considerable, permite un mayor número de líneas de fuerza sin necesidad de incrementar el voltaje a un valor elevado, y presenta una menor saturación magnética, lo que implica que el transporte de las partículas, sea más eficaz.

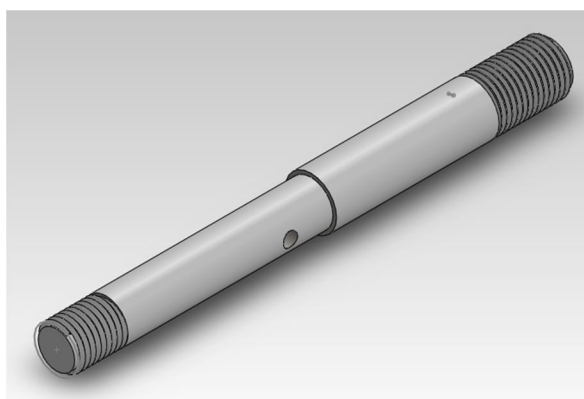


Figura 3.35 Vástago

Fuente: Propia de los autores

El vástago está hecho de acero, que tiene un terminado de cromo en la superficie, que provee una resistencia a la corrosión y al desgaste por la fricción entre los elementos mecánicos, así también de un buen acabado superficial.

Para colocar el electroimán en el vástago, a fin de que este actúe como núcleo y permita la movilidad del campo magnético a lo largo de la cámara, donde se encuentra el FMR, se realizó el mecanizado y desbaste de la superficie en un extremo, en el cual se colocarán los elementos correspondientes. Esta sección tendrá una longitud de 72 mm incluido la parte roscada, como se ve en la figura 3.36.

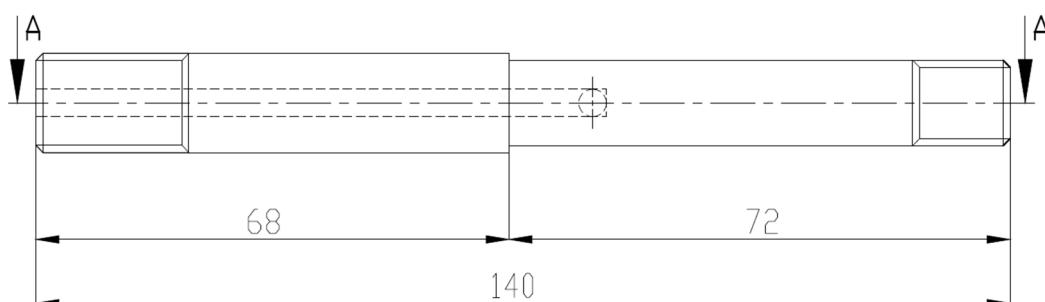


Figura 3.36 Dimensiones del vástago

Fuente: Propia de los autores

Se consideró también la manera de proveer de la alimentación del electroimán, para esto se realizó un agujero en el interior del vástago, con un diámetro de 4mm y una longitud de más de 82 mm, por donde irán los cables de alimentación del electroimán. Como se detalla en la figura 3.37.

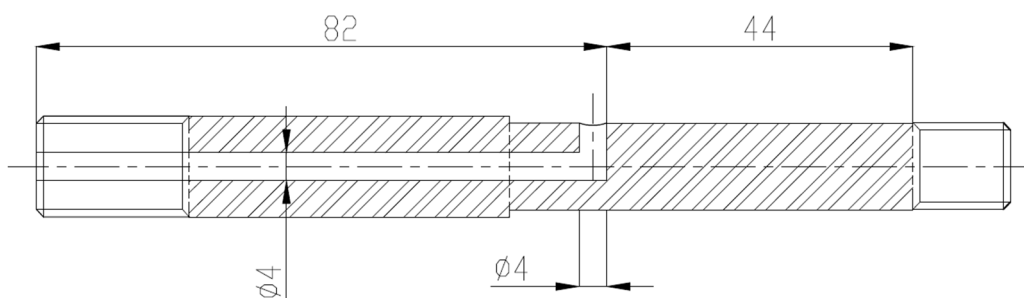


Figura 3.37 Agujero para alimentación del electroimán

Fuente: Propia de los autores

3.2.2.2 Limitador de flujo

Partiendo del principio de amortiguación, el cual se basa en la oposición que presenta el aceite para fluir de un lado a otro de la cámara a través de orificios. Por lo tanto para nuestro diseño, se requiere de un limitador de flujo (ver figura 3.38).



Figura 3.38 Limitador de flujo

Fuente: Propia de los autores

Estos mueven al fluido a través de sus orificios, generando oposición al movimiento del fluido y direccionando al fluido con las líneas de fuerza producidas por el campo magnético. De las dimensiones de estos orificios depende el coeficiente de amortiguamiento, ya que si estos orificios son muy pequeños no se permitirá el paso del FMR a través de la ellos, disminuyendo

el volumen de FMR que interactúa con el campo magnético; y si se tiene orificios muy grandes, disminuirá considerablemente el coeficiente de amortiguamiento.

A continuación en la figura 3.39 podemos observar las medidas para la construcción del limitador de flujo.

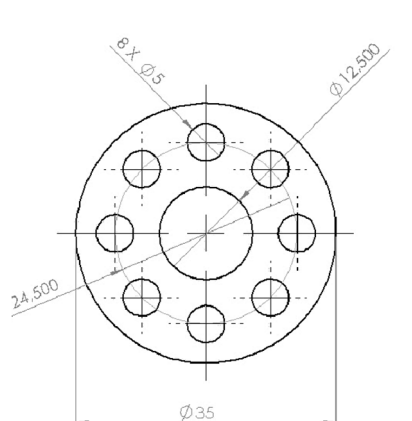


Figura 3.39 Dimensiones del limitador de flujo

Fuente: Propia de los autores

Por esto se decide realizar ocho orificios con un diametro de 5mm, basándonos en el diseño del limitador de flujo que tenía previamente el amortiguador. Este diseño permite que el flujo circule a través de los orificios, con un caudal controlado (), este caudal depende del volumen de FMR que fluye en el interior del cilindro, en un determinado tiempo.

Tenemos un volumen útil (), que corresponde a la diferencia entre el volumen total del cilindro () y el volumen que ocupa el electroimán ().

Por lo tanto obtenemos el siguiente valor de caudal, para un FMR del 20% de concentración, tomando el tiempo promedio (t), en el que el pistón recorre la carrera del amortiguador.

$$Q = \frac{\Delta V}{t} \quad 3.3$$

$$Q = \frac{1,314 \times 10^{-5} m^3}{0.6 s}$$

$$Q = 2,191 \times 10^{-5} m^3/s$$

Para determinar el área (A_t) necesaria para obtener este valor de caudal, utilizamos la siguiente ecuación, con una velocidad promedio (v), con la que el pistón recorre la carrera del amortiguador.

$$A_t = \frac{Q}{v} \quad 3.4$$

$$A_t = \frac{2,191 \times 10^{-5} m^3/s}{0,0636 m/s}$$

$$A_t = 3,445 \times 10^{-4} m^2$$

Para nuestro diseño realizamos ocho perforaciones en los dos limitadores de flujo, que nos da un área parcial para cada orificio (A).

$$A = \frac{3,445 \times 10^{-4} m^2}{16}$$

$$A = 2,153 \times 10^{-5} m^2$$

Finalmente obtenemos el valor del diámetro (d) apropiado para cada perforación.

$$d = 2 * \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad 3.5$$

$$d = 2 * \sqrt{\frac{2,153 \times 10^{-5} m^2}{\pi}}$$

$$d = 5,2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$d = 5,2 \text{ mm} \sim \mathbf{5.0 \text{ mm}}$$

El espesor de este elemento es de 10mm, esto debido a las limitaciones de longitud que tenemos y a fin de tener espacio par alojar a la bobina del electroimán.

Es necesario colocar un cojinete de bronce en el limitador de flujo, el cual permitirá centrar al conjunto mecánico émbolo-vástago dentro del cilindro y aislar al cilindro del circuito magnético, que es transmitido a través de los limitadores de flujo. Debido a que el bronce, es un material diamagnético que posee una baja permeabilidad magnética, es decir, que su capacidad para transmitir campos magnéticos es muy baja, evitando así que el pistón se adhiera a las paredes del cilindro. Además al tratarse de un material suave con un coeficiente de fricción bajo con respecto al acero, reducirá el desgaste de las paredes del cilindro debido al continuo deslizamiento y permitirá centrar correctamente al pistón dentro de la cámara.

3.2.2.3 Carrete

El sentido y la forma de las líneas magnéticas dependen directamente de la forma geométrica del electroimán, por lo tanto se adoptará para el electroimán una forma geométrica cilíndrica, que resulta adecuada, ya que se adapta perfectamente al sitio donde tiene que moverse concéntricamente a la cámara, además, las líneas magnéticas alinean a las partículas de tal manera que la oposición al flujo permita que tales partículas se desplacen e ingresen otras. La medida del núcleo del electroimán sumada a la del

número de capas de espiras, que se necesitan para provocar el campo magnético, no debe ser un valor mayor al diámetro del limitador de flujo como se observa en la figura 3.40.

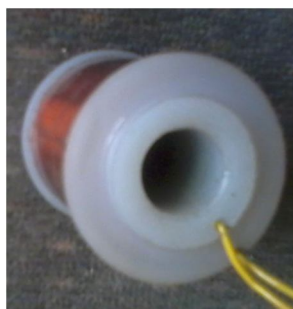


Figura 3.40 Carrete

Fuente: Propia de los autores

El carrete es un elemento esencial, ya que en este se enrollara el alambre esmaltado para crear el bobinado, y actúa como aislante entre el núcleo y el conductor eléctrico. Se utilizó grillón ya que es un material duro, resistente a la corrosión, y un aislante magnético. Por lo tanto se diseñó un carrete para alojar la bobina del electroimán, con las dimensiones que se observan en la figura 3.41.

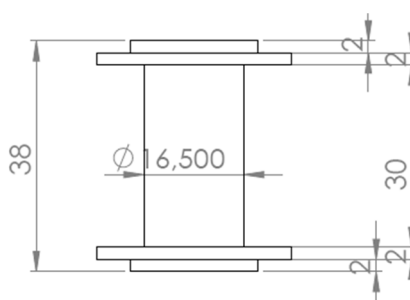


Figura 3.41 Dimensiones del carrete

Fuente: Propia de los autores

3.2.2.4 Cilindro

Para asegurar un cierre hermético del amortiguador y evitar así posibles fugas del FMR, se tomó dos consideraciones: la primera, determinar la

manera más adecuada, para unir al cilindro con su respectiva tapa (ya fueron cortados anteriormente), y la segunda, encontrar una manera de sellar al cilindro, debido a que existe una holgura entre el cilindro y el vástago en el extremo superior, donde se encuentra la tapa (figura 3.42).



Figura 3.42 Tapa del cilindro

Fuente: Propia de los autores

Por lo tanto, se realizó un roscado en la parte interior del cilindro, así también como en la tapa, para realizar un cierre hermético y además nos permita abrir y cerrar el amortiguador, a fin de colocar los diferentes FMR con distintas características y realizar las respectivas pruebas y análisis. También se colocó un empaque de caucho circular en una cavidad mecanizada en la tapa del cilindro, como se muestra en la figura 3.43, a fin de sellar el extremo superior, en donde se encuentra en movimiento el vástago, evitando así una fuga de fluido al momento de realizar las pruebas.

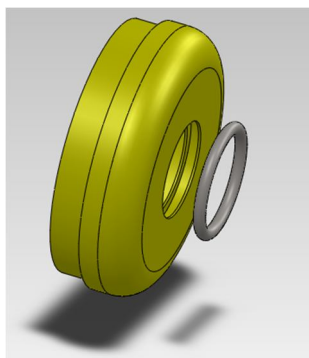


Figura 3.43 Empaque de caucho y tapa del cilindro

Fuente: Propia de los autores

3.2.3 MONTAJE DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS DEL AMORTIGUADOR

Una vez terminado el diseño y la fabricación de los componentes mecánicos del amortiguador, procedemos a realizar el montaje de estos elementos, siguiendo los pasos que se mencionan a continuación:

- a. Colocamos en el vástago los limitadores de flujo con sus respectivos cojinetes de bronce, el carrete con el bobinado y una tuerca para ajustar y asegurar los componentes, así como se muestra en la figura 3.44.

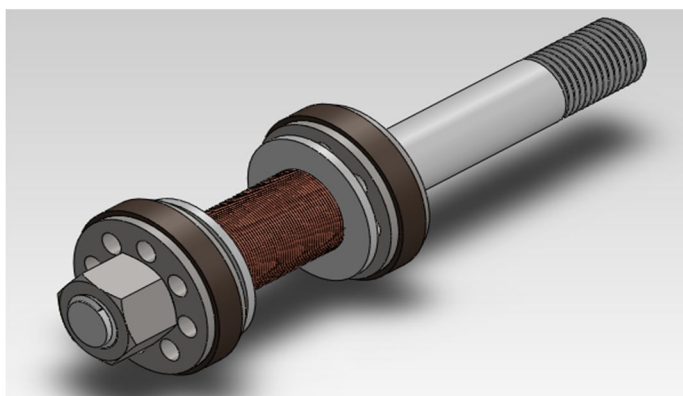


Figura 3.44 Montaje en el vástago

Fuente: Propia de los autores

Se debe colocar con mucho cuidado carrete con el bobinado, asegurándose de que los cables de alimentación del electroimán pasen a través del orificio realizado en el vástago, para ese propósito.

- b. Verificamos que el electroimán esté funcionando, para lo cual se aplica un voltaje y se comprueba su capacidad de atracción magnética.

- c. Colocamos el vástago en el cilindro, asegurándose de que este lo más centrado posible, para evitar rayaduras en el interior del cilindro (ver figura 3.45).

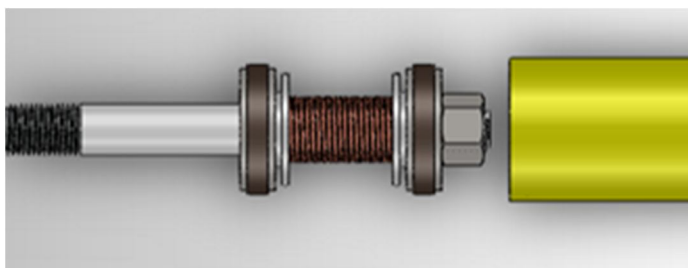


Figura 3.45 Montaje del vástago en el cilindro

Fuente: Propia de los autores

- d. Se procede a colocar el FMR, de acuerdo a la capacidad que el amortiguador posee (figura 3.46).



Figura 3.46 Colocación del FMR

Fuente: Propia de los autores

- e. Colocamos cinta de teflón alrededor de la rosca de la tapa del cilindro; para evitar que existan filtraciones de FMR, a través de la tapa, cuando comience a realizarse las pruebas en el amortiguador, debido a la presión que existe en el interior del cilindro. Luego porcedemos a colocar y ajustar la tapa en el cilindro.
- f. Una vez realizado todos los ajustes, debemos realizar las siguientes observaciones:

- Verificar que el amortiguador no tenga problemas de fugas del FMR.
- Verificar el correcto desplazamiento del pistón dentro del cilindro, sin que exista alguna traba.
- Una vez aplicado un voltaje al electroimán, verificar que no exista adhesión a las paredes debido al campo magnético.

3.3 DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL ELECTROIMÁN

El proceso de diseño de un electroimán requiere un conocimiento de las leyes básicas del electromagnetismo. Para un dispositivo óptimo es esencial un buen diseño, eligiendo los materiales y procedimientos de construcción adecuados. Principalmente los mayores retos para la construcción de dicho dispositivo son:

- Elegir un buen material ferromagnético, que presente una baja reluctancia y permita un buen desempeño.
- Calcular la corriente necesaria para generar un campo magnético capaz de ejercer una fuerza suficiente para levantar las partículas metálicas del FMR.
- Elegir el calibre de conductor adecuado a fin de transportar sin degradarse la corriente calculada para proporcionar la fuerza magneto motriz necesaria

Para nuestro proyecto se considera primeramente el espacio que debe ocupar los elementos constitutivos del electroimán (núcleo, carrete,

bobinado), el cual está limitado por el cilindro que posee un diámetro de 38mm en donde se desplaza el pistón.

Se utilizó como núcleo del electroimán el vástago del pistón del amortiguador, el cual es de acero y posee terminado superficial de cromo, por lo cual fue necesario devastar su superficie en el torno, obteniendo un material con núcleo de acero de 12.5 mm de diámetro.

El área de sección transversal del vástago es:

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = 1.227 * 10^{-4} m^2 \quad 3.6$$

La reluctancia es igual a:

$$R = \frac{l}{\mu_r * S} = \frac{0,030}{100 * (4\pi * 10^{-7}) * 1.227 * 10^{-4}} = 1945683 \text{ rels} \quad 3.7$$

La fuerza magneto motriz es igual a:

$$Fm = N * I \quad 3.8$$

$$Fm = 1504 * 1 = 1504 \text{ Amp} - \text{vuelta}$$

Dónde:

N es el número de vueltas de la bobina.

I es la corriente que circulara por la bobina.

El valor de la inducción magnética se obtiene de la siguiente manera:

$$B = \frac{Fm}{S * R} \quad 3.9$$

$$B = \frac{1504}{1,227 * 10^{-4} * 1945683} = 6,29 \text{ T}$$

El siguiente paso es obtener el flujo magnético

$$\emptyset = B * S \quad 3.10$$

$$\emptyset = 20,16 * 1,227 * 10^{-4} = 7,73 * 10^{-4} \text{ Wb}$$

La corriente del bobinado será de 1 A, y a un voltaje nominal de 12 v, por lo cual se toma un factor de protección del 30%. Tenemos que

18

3.11

De la tabla de valores normalizados de cables A.W.G (ver Anexo A-3.2), se tiene que el valor comercial más próximo es de 0,3211mm correspondientes al calibre AWG 28.

3.12

Se realizó un circuito convencional, el cual se observa en la figura 3.47 y nos permite hacer la variación del voltaje que ingresa al electroimán, esto para poder realizar los ensayos de medición de viscosidad.

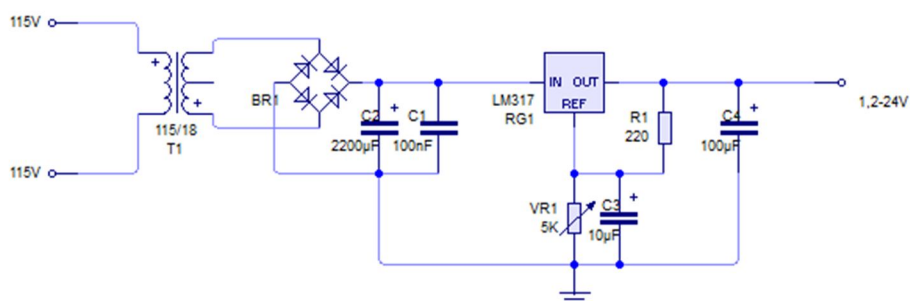


Figura 3.47 Circuito para los ensayos de medición de viscosidad

Fuente: Propia de los autores

CAPITULO 4

ANÁLISIS DEL SISTEMA MECÁNICO

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA METÁLICA

Se tomó como parte del sistema, una estructura metálica del laboratorio de Mecanismos y servomecanismos, para montar el amortiguador magnetoreológico. A continuación en la figura 4.1 se detalla el sistema mecánico, previo al montaje del amortiguador magnetoreológico.

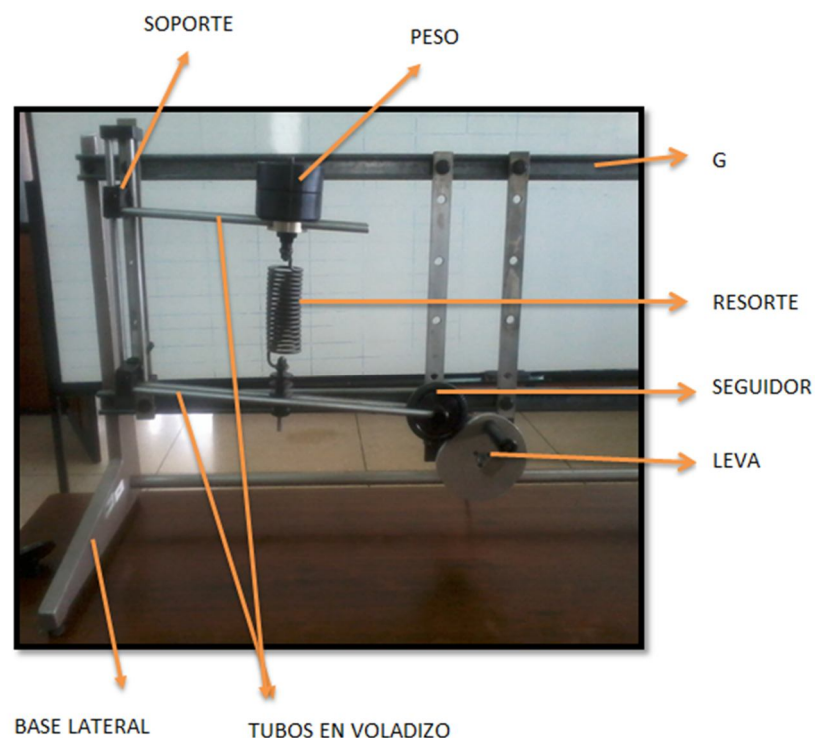


Figura 4.1 Estructura metálica del laboratorio de mecanismos y servomecanismos

Fuente: Propia de los autores

Barras superiores e inferiores: Se tienen 4 tubos en voladizo ubicados dos en la parte superior y dos en la parte inferior, los cuales están apoyados a un soporte vertical, en cada uno de sus extremos mediante un elemento de sujeción.

Soportes: La estructura tiene dos soportes colocados entre dos tubos verticales; por medio de un perno permite mover su posición verticalmente y este a su vez, a las barras en voladizo.

Resorte: Tenemos un resorte helicoidal de compresión y tracción estándar, que está montado entre los tubos en voladizo, por medio de una varilla roscada y un conjunto de tuercas y rodela. Este resorte permite la absorción de energía o cargas que se produce en el sistema y es un elemento activo en el sistema, para aumentar o disminuir vibraciones dependiendo de otros parámetros como es el coeficiente de amortiguamiento y la frecuencia del sistema.

Leva: Se encuentra colocada por medio de un eje a la estructura. Su contorno rige el movimiento del sistema, generando desplazamientos en los tubos inferiores y consecuentemente vibraciones en el sistema.

Seguidor: Ubicado entre los dos tubos en voladizo de la parte inferior tenemos como seguidor a una rueda de plástico que se mantiene en contacto con la leva, siguiendo las variaciones del perfil de la leva cuando este gira.

La estructura posee dos bases laterales, a las cuales se encuentran sujetas dos correderas en forma de G; estas a su vez nos permiten movilizar

los soportes que contienen al resorte y al amortiguador magnetoreológico, que se montará en dicha estructura.

4.2 MONTAJE DE LOS ELEMENTOS ACTIVOS DEL SISTEMA

EL sistema consta de cuatro elementos principales que actúan en el mismo, como son: la masa, el resorte, el amortiguador magnetoreológico y el motor. El conjunto masa - resorte se encuentran ya montadas, como se lo describió anteriormente. El montaje tanto del amortiguador magnetoreológico, como del motor se describe en la siguiente sección.

4.2.1 MONTAJE DEL AMORTIGUADOR MAGNETOREOLÓGICO

El amortiguador magnetoreológico, es el elemento principal de este proyecto, su diseño y construcción se detalló en el capítulo anterior; para el montaje de este elemento en la estructura metálica, se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La longitud del amortiguador determinará la posición de las barras superior e inferior.
- Las sujeciones para el montaje del amortiguador requiere de un grado de libertad en cada uno de sus extremos debido al movimiento angular que presenta el sistema; es necesario diseñar un mecanismo que convierta este movimiento angular a un movimiento rectilíneo adecuado para el desplazamiento del pistón del amortiguador.

Por lo tanto, debido a que el amortiguador tiende a deslizarse en las barras, desde el momento en que inicia el movimiento del sistema, se ha

diseñado un mecanismo de giro que permite al amortiguador: un desplazamiento rectilíneo del pistón manteniendo fijos los puntos de sujeción; que sea de fácil fabricación; adaptable al amortiguador y que no signifique un aumento considerable en la longitud del conjunto mecánico del amortiguador al momento de realizar el montaje en el sistema.

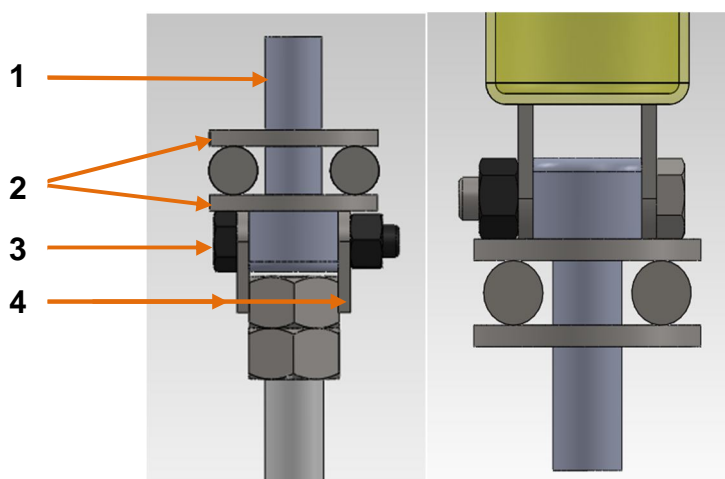


Figura 4.2 Mecanismos de giro superior e inferior del amortiguador

Fuente: Propia de los autores

Este mecanismo de giro, estará colocado en la parte superior e inferior del amortiguador magnetoreológico y consta de los siguientes componentes:

(1) Pernos de sujeción: Los pernos permiten fijar al amortiguador en los dos extremos al amortiguador, evitando que se este se deslice, cuando se produzca el movimiento.

(2) Arandelas de sujeción: Para colocar y asegurar el amortiguador se realizaron 4 arandelas, dos de estas con roscado para la parte superior, y así sujetar la parte superior entre los tubos en voladizo de la estructura. Y dos para la parte inferior que conjuntamente con un perno sujetarán la parte inferior del amortiguador.

(3) Pasador: Se trata de un perno, de diámetro 8mm y 5cm de longitud, este permite que el amortiguador tenga un grado de libertad, para que se puede acoplar al movimiento angular que tiene el sistema.

(4) Orejas o soportes Permite al pasador realizar el giro, y están sujetas en cada extremo del amortiguador, para unir el mecanismo de giro con el amortiguador magnetoreológico. En la parte superior se soldaron las orejas a una tuerca para poder roscarla al vástago y en la parte inferior se soldaron al cilindro.

4.2.2 MONTAJE DEL MOTOR

El motor es el elemento que genera el movimiento y determina la velocidad y frecuencia de las oscilaciones que ingresa en el sistema, lo cual es un parámetro importante para realizar el análisis del funcionamiento mecánico del sistema y de las vibraciones que se pueden generar.

Para colocar el motor en la estructura se realizó una placa de 160 x 80 x 5 mm, esta será colocada mediante pernos a las barras transversales. Además se diseñó un eje para transmitir el movimiento del motor a la leva y por consiguiente a todo el sistema (ver figura 4.3).

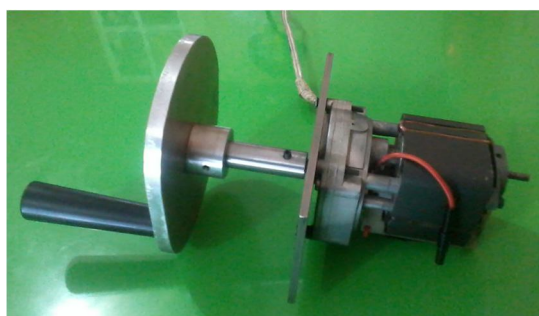


Figura 4.3 Motor unión leva

Fuente: Propia de los autores

4.3 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL SISTEMA

Para realizar el análisis del funcionamiento del sistema, es necesario obtener los parámetros (k , c , m) que actúan directamente en el sistema, para esto se realizan mediciones en elementos reales que intervienen en el funcionamiento de dicho sistema. Estos elementos se encuentran montados en la estructura, y sus parámetros son:

k : Constante del muelle o resorte.

c : Coeficiente de amortiguación del amortiguador.

m : Masa de suspendida del sistema.

4.3.1 MEDICIÓN DE LA CONSTANTE DEL RESORTE

En el muelle se obtiene la constante de deformación proporcional k , aplicando la Ley de Hooke, esta dice que: *“la elongación que produce en un muelle una fuerza deformadora es proporcional a la fuerza aplicada”*, su ecuación es $F_k = k * \Delta x$ y se aplica en casos estáticos, ya que para efectos dinámicos se debe considerar la inercia que toma el muelle al descargar o cargarse de energía. Se ha elegido la ecuación sin corrección por efectos de simplificar los cálculos.

Por lo tanto se realiza un ensayo a fin de obtener el valor de la constante de deformación del resorte k .

Ensayo para la medición de la constante del resorte

Objetivo:

Determinar estáticamente la constante de deformación K , aplicando la ley de Hooke.

Materiales y Equipos:

- Estructura de montaje del resorte
- Porta pesas
- Juego de pesas de 1kg, 2kg, 5kg
- Un flexómetro

Procedimiento:

1. Después de tener montado el resorte en la estructura metálica, realizamos la medición de la longitud que este posee inicialmente, antes de colocar las pesas.
2. Colocamos los siguientes pesos en la estructura 1, 2, 3 4 y 5 kg, y realizamos respectivas mediciones de longitud.

Resultados:

Diámetro (mm)	55
Espesor (mm)	5
Longitud resorte (mm)	145

Tabla 4.1 Datos y resultados del ensayo en el resorte

Masa (Kg)	Fuerza (N)	Longitud inicial (mm)	Longitud final (mm)		ΔL (mm)	K (N/m)	
			Medida	Media		Resultado	Media
1	12,94	145	142	142,17	2,83	4566,84	
			142,5				
2	22,75	145	142	139,83	5,17	4403,11	
			140				
3	32,56	145	140	137,83	7,17	4543,17	4434, 03
			138				
4	42,37	145	138	135,17	9,83	4308,75	
			137,5				
5	52,18	145	135,5	133	12	4348,28	
			135				
			133				
			133				

Fuente: Propia de los autores

Ejemplo de cálculo:

$$\text{Masa total} \quad M = m_p + m_i \quad 4.1$$

$$M = (1 + 0,319) \text{ kg}$$

$$M = 1,319 \text{ kg}$$

$$\text{Fuerza} \quad F = M * g \quad 4.2$$

$$F = 1,319 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$F = 12,94 \text{ N}$$

$$\text{Constante de elasticidad K} \quad K = \frac{F}{\Delta L} \quad 4.3$$

$$K = \frac{12,94 \text{ N}}{0,00283 \text{ m}}$$

$$K = 4566,84 \text{ N/m}$$

Se observa que existe proporcionalidad en cuanto al valor de la deformación en relación con los pesos, por lo tanto se calcula la media y se obtiene el valor la constante de deformación $K = 4434,03 \text{ N/m}$.

4.3.2 MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE AMORTIGUACIÓN

El coeficiente de amortiguamiento viscoso, se obtiene de la ecuación que describe el elemento, es $F_c = c * \dot{x}$, pues en este caso aparece como una variable la velocidad y según la teoría: “El amortiguamiento viscoso está caracterizado por el hecho de que la fuerza de fricción y rozamiento es directamente proporcional a la velocidad del cuerpo en movimiento” (Beer & Johnston, 2007), esta velocidad está dada directamente por la carga que se aplica.

Se realiza un ensayo para obtener los datos del amortiguador, aplicando una carga produciendo compresión y tomando los tiempos en que el pistón recorre la distancia total de su carrera.

Ensayos para la medición del coeficiente de amortiguación

Objetivo:

Determinar estáticamente la constante de amortiguamiento c .

Materiales y Equipos

- Estructura de montaje
- Porta pesas

- Juego de pesas de 100gr, 200gr, 500 gr, 1Kg, 2kg
- Un cronómetro

Procedimiento

1. Montar el amortiguador en la estructura metálica y colocarlo en la posición de extensión. Se utiliza tres muestras de FMR, con 0, 10 y 20 % de concentración de partículas, sin realizar la aplicación de un campo magnético; esto para determinar el coeficiente de amortiguamiento en una condición inicial.
2. Colocamos las combinaciones de pesas correspondientes en la estructura para cada muestra de FRM, a mayor concentración se aumentara el peso, debido a que el amortiguador aumenta su rigidez; posteriormente tomamos los tiempos respectivos en el que pistón llega a su posición de compresión.

Resultados:

Tabla 4.2 Datos del ensayo en el amortiguador con un FRM al 0%

Masa (g)	Distancia = 35 mm		v (m/s)	c (N x s/m)	Promedio (N x s/m)
	t1 (s)	t2 (s)			
500	0,8	0,81	0,0435	184,79	176,18
600	0,7	0,72	0,0493	182,88	
700	0,61	0,63	0,0565	177,08	
800	0,51	0,51	0,0686	159,96	

Fuente: Propia de los autores

Tabla 4.3 Datos del ensayo en el amortiguador con un FRM al 10%

Masa (g)	Distancia = 35 mm		v (m/s)	c (N x s/m)	Promedio (N x s/m)
	t1 (s)	t2 (s)			
1000	0,8	0,81	0,0435	297,61	315,48
1500	0,61	0,64	0,0560	318,65	
2000	0,52	0,5	0,0686	331,49	
2500	0,35	0,4	0,0933	296,30	

Fuente: Propia de los autores

Tabla 4.4 Datos del ensayo en el amortiguador con un FRM al 20%

Masa (g)	Distancia = 35 mm		v (m/s)	c (N x s/m)	Promedio (N x s/m)
	t1 (s)	t2 (s)			
1500	0,78	0,75	0,0458	390,03	394,09
2000	0,61	0,6	0,0579	393,24	
2500	0,52	0,49	0,0693	399,01	
3000	0,41	0,4	0,0864	376,76	

Fuente: Propia de los autores

Cálculos:

Masa total

$$M = m_p + m_i$$

$$M = (0,5 + 0,319) \text{ kg}$$

$$M = 0,619 \text{ kg}$$

Fuerza

$$F = M * g$$

$$F = 0,619 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$F = 6,07 \text{ N}$$

Constante de amortiguación

$$c = \frac{F}{v}$$

$$c = \frac{6,07 \text{ N}}{0.0435 \text{ m/s}}$$

$$c = 184,79 \text{ Nxs/m}$$

Se obtiene como valor del coeficiente de amortiguación, un valor medio $c_o = 176,18 \text{ Nxs/m}$, para un fluido que no posee partículas metálicas inmersas. Al comparar este valor con el coeficiente de amortiguación $c_1 = 315,48 \text{ Nxs/m}$ y $c_2 = 394,09 \text{ Nxs/m}$, correspondientes a los FMR de 10 y 20 % de concentración de partículas metálicas, se puede observar que existe un aumento considerable de este coeficiente a pesar de que no existe una aplicación de campo magnético. De esta manera se tendrá un sistema que inicialmente posee menos oscilaciones o vibraciones y a medida que se aplique un campo magnético creciente; resultando en un coeficiente de amortiguación mayor; por lo que tendremos un sistema con una reducción de las oscilaciones en el sistema en rango menor, ya que el sistema se encuentra inicialmente amortiguado.

4.3.3 MASA SUSPENDIDA DEL SISTEMA

La masa que se encuentra montada en la estructura, no tiene un peso especificado, por lo que se debe calcular este valor utilizando la ecuación para la obtención de la constante del resorte. Esta masa comprime el resorte a 132 mm.

$$F = k * \Delta L \tag{4.5}$$

$$F = 4434,03 \frac{\text{N}}{\text{m}} \times 0,013 \text{ m}$$

$$F = 57,64 \text{ N}$$

$$M = \frac{F}{g} \quad 4.6$$

$$M = \frac{57,64 \text{ N}}{9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$M = 5,875 \text{ Kg}$$

$$m_p = M - m_i \quad 4.7$$

$$M = (5,875 - 0,319) \text{ kg}$$

$$\mathbf{M = 5,56 \text{ kg}}$$

El valor de la masa suspendida en el sistema es 5,56 Kg.

4.4 ANÁLISIS DEL CONJUNTO MECÁNICO

4.4.1 MODELO DINÁMICO

Para este sistema amortiguador-masa-resorte, que se encuentra sometido a vibraciones producidas por la leva que gira a velocidad constante, así como se muestra en la Figura 4.4; tomamos el modelo matemático de un sistema sometido a vibraciones forzadas amortiguadas con movimiento de base, el cual se adapta perfectamente a las condiciones que presenta nuestro sistema.

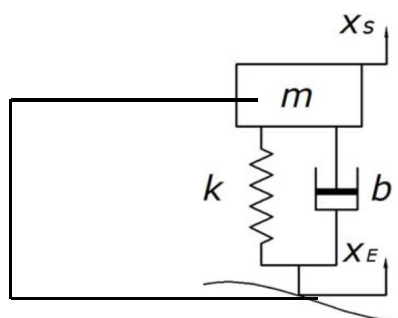


Figura 4.4 Modelo Dinámico

Fuente: Propia de los autores

Dinámicamente el sistema está representado por una ecuación diferencial de segundo grado, donde interviene la masa suspendida (**m**), la fuerza que presenta el resorte a la deformación en uno y otro sentido , y la fuerza de fricción ejercida por el pistón al desplazarse a través del fluido que se encuentra dentro del amortiguador .

4.8

4.9

Si:

;

4.10

;

4.11

Entonces:

4.12

De lo cual, se puede obtener la expresión de la amplitud vibratoria producto del movimiento de la base, reemplazando en la ecuación de la

solución estacionaria, del comportamiento dinámico de un modelo ideal con amortiguamiento viscoso (ver anexo A-4.1).

$$X_S = \frac{F_0/k}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\Omega}{W_n}\right)^2\right]^2 + \left[\frac{2\zeta\Omega}{W_n}\right]^2}} \quad 4.13$$

$$X_S = \frac{x_E \sqrt{c^2 \Omega^2 + k^2} / k}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\Omega}{W_n}\right)^2\right]^2 + \left[\frac{2\zeta\Omega}{W_n}\right]^2}}$$

$$X_S = x_E \sqrt{\frac{1 + \left[\frac{2\zeta\Omega}{W_n}\right]^2}{\left[1 - \left(\frac{\Omega}{W_n}\right)^2\right]^2 + \left[\frac{2\zeta\Omega}{W_n}\right]^2}}$$

Luego obtenemos los valores de la ecuación, a partir de los parámetros del sistema.

Tenemos que:

$$k = 4434,03 \text{ N/m}$$

$$m = 5,56 \text{ Kg}$$

$c_0 = 176,18 \text{ Ns/m}$ (Coeficiente de amortiguamiento, con un FMR al 0% de concentración)

$c_{10\%} = 315,48 \text{ Ns/m}$ (Coeficiente de amortiguamiento, con un FMR al 10% de concentración)

$c_{20\%} = 394,09 \text{ Ns/m}$ (Coeficiente de amortiguamiento, con un FMR al 20% de concentración)

Por lo tanto:

Frecuencia *natural* (W_n)

$$W_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad 4.14$$

$$W_n = \sqrt{\frac{4434,03}{5,56}}$$

$$W_n = 28,24$$

Factor de amortiguación (ζ)

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{m*k}} \quad 4.15$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{5,56 * 4434,03}}$$

$$\zeta = \frac{c}{313,74}$$

$$\zeta = \frac{176,18}{313,74}$$

$$\zeta = 0,56$$

Constante de amortiguamiento crítico (c_c): El valor máximo de c , para que el sistema vibre.

$$c_c = 2mW_n \quad 4.16$$

$$c_c = 2 * 5,56 * 28,24$$

$$c_c = 314,027 \text{ Ns/m}$$

Es importante usar un FMR que permita un coeficiente de amortiguamiento inicial, que sea menor o cercano al valor de la constante de amortiguamiento crítico, para que exista una mayor oscilación en el sistema, y de esta manera se pueda determinar que a medida que aumenta el campo magnético existe una reducción de las oscilaciones en el sistema que está en vibración.

Se utilizará un FMR con el 10% y 20% de concentración de partículas metálicas, para realizar los ensayos y pruebas correspondientes en cuanto al funcionamiento del sistema.

Transmisibilidad (TR): Es la razón que existe entre las amplitudes de vibración del sistema X_S y la vibración de la base x_E , cuya ecuación es la siguiente:

$$\frac{X_S}{x_E} = \sqrt{\frac{1 + \left[\frac{2\zeta\Omega}{W_n}\right]^2}{\left[1 - \left(\frac{\Omega}{W_n}\right)^2\right]^2 + \left[\frac{2\zeta\Omega}{W_n}\right]^2}} = TR \quad 4.17$$

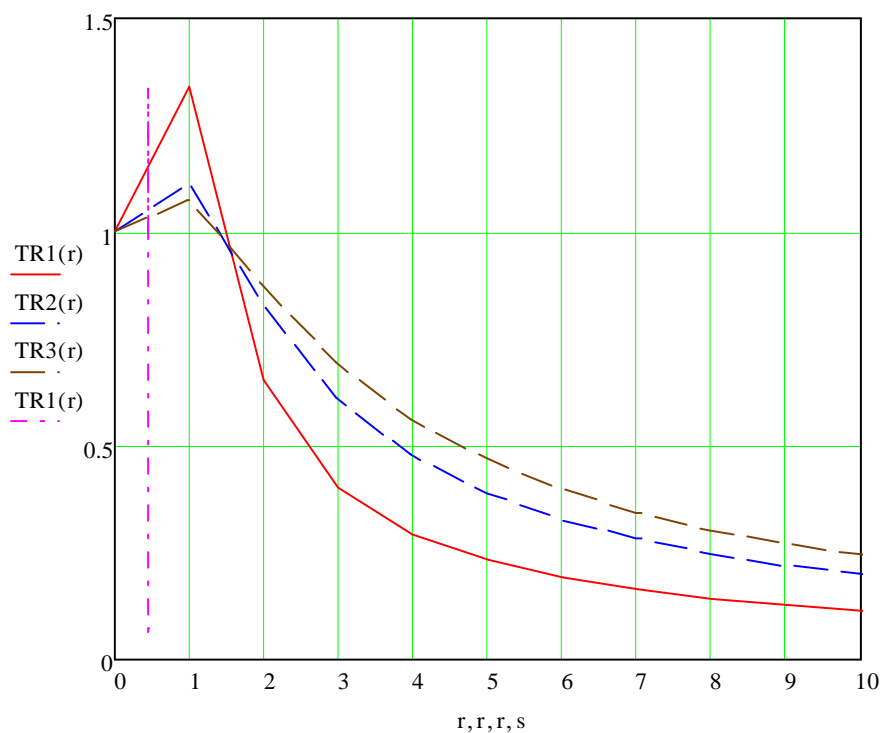


Figura 4.5 Gráfica de transmisibilidad vs relación de frecuencias

TR1(r): Para un sistema con Co.

TR2(r): Para un sistema con C1.

TR3(r): Para un sistema con C2.

Fuente: Propia de los autores

En el gráfico adimensional de la figura 4.5, se puede observar:

- a) A pesar de que la fuerza F_o aplicada, sea constante, el valor de la respuesta estacionario X_s , con respecto a la vibración de la base, es de magnitud muy variable. Dependiendo del valor $\frac{\Omega}{W_n}$, X_s puede llegar a tener valores infinitos, cuando este cociente es uno (para sistemas no amortiguados); y a valores tendientes a cero para $\frac{\Omega}{W_n}$ muy grandes.
- b) Cuando el valor $\frac{\Omega}{W_n}$, es cercano a uno, se generan altas amplitudes vibratorias, el sistema entra en resonancia. Por lo tanto, es fundamental cuando se diseña un sistema mecánico, determinar la frecuencia natural del sistema para evitar que esta coincida con la frecuencia de excitación y se produzca algún problema de resonancia.
- c) El amortiguamiento es efectivo solamente como método para disminuir las vibraciones en la zona resonante. En nuestro sistema esta zona resonante, se encuentra entre los valores de $\frac{\Omega}{W_n}$, mayores a 0,2 y menores a 1,4.

Por lo tanto el valor de la frecuencia de excitación (Ω), a la cual deberá funcionar el sistema, se obtiene de la siguiente manera:

$$r = \frac{\Omega}{W_n} \quad 4.18$$

$$\Omega(r) = r * W_n$$

Para obtener el rango de velocidades permisibles del motor, en RPM:

$$V(r) = r * W_n * \frac{60}{4\pi} \quad 4.19$$

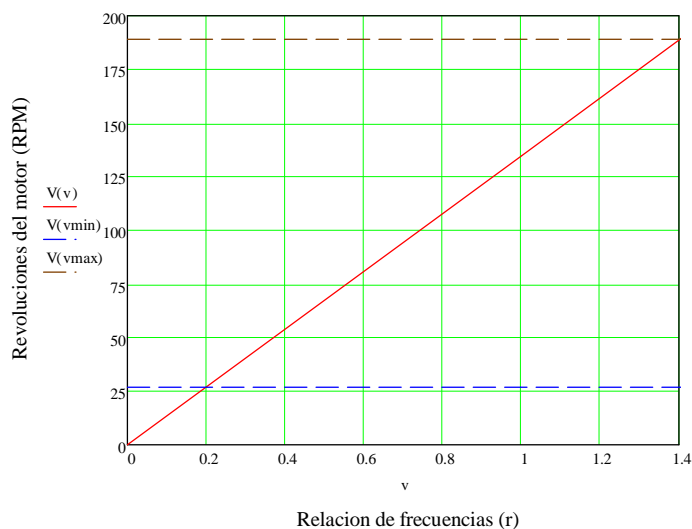


Figura 4.6 Gráfica de Velocidad del motor vs relación de frecuencias

Fuente: Propia de los autores

Como se observa en la figura 4.6 el rango de velocidad del motor, debe estar entre 27 a 185 RPM, evitando que coincida con el valor de resonancia $V(1) = 135 \text{ RPM}$.

4.4.2 MODELO MECÁNICO

Para realizar un análisis del sistema mecánico, se utilizó el software Working Model; con los valores de la masa, constante del resorte, coeficiente de amortiguamiento y velocidad del motor que previamente fueron calculados; así también como las dimensiones de los componentes mecánicos del sistema: barras, leva, seguidor, puntos de sujeción y distancias entre los elementos (ver figura 4.7).

De esta manera podemos determinar las magnitudes de las fuerzas producidas en el resorte y amortiguador, la frecuencia y la amplitud de oscilaciones que se produce en el sistema. Además nos permite comprobar el funcionamiento adecuado del conjunto mecánico, asegurándose de que

no existen choques bruscos entre la leva y el seguidor, o posibles atascos de los elementos mecánicos

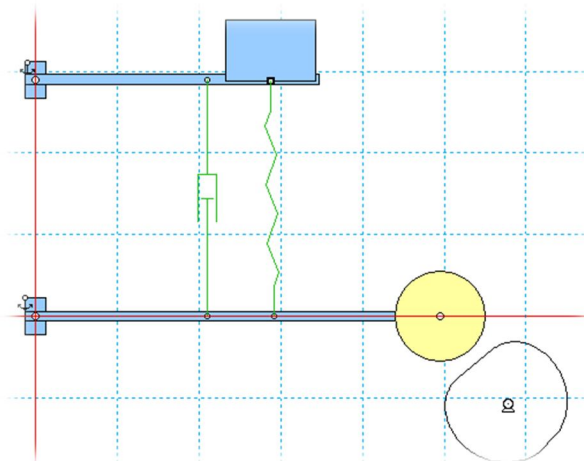


Figura 4.7 Conjunto mecánico en Working Model

Fuente: Propia de los autores

4.5 SIMULACIÓN DEL CONJUNTO MECÁNICO

Una vez determinadas las fuerzas y cargas aplicadas por los elementos mecánicos activos del sistema mediante la simulación del modelo mecánico, procedemos a realizar las simulaciones de los componentes mecánicos, para determinar su funcionalidad, la resistencia a las cargas que se producen y las dimensiones que debe poseer el eje de motor, para acoplarse al conjunto mecánico.

4.5.1 SIMULACIÓN DEL PASADOR DEL MECANISMO DE GIRO

El pasador de giro (figura 4.8) brinda al amortiguador MR de un grado de libertad en cada uno de sus extremos.

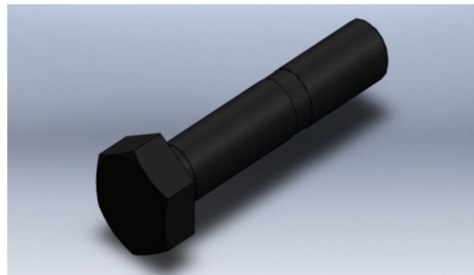


Figura 4.8 Pasador de giro
Fuente: Propia de los autores

Suposiciones

Este está sometido a cargas producidas (figura 4.9) por la tensión del amortiguador y el peso de la masa del sistema, con un valor $F_v=150$ N en el caso más crítico.

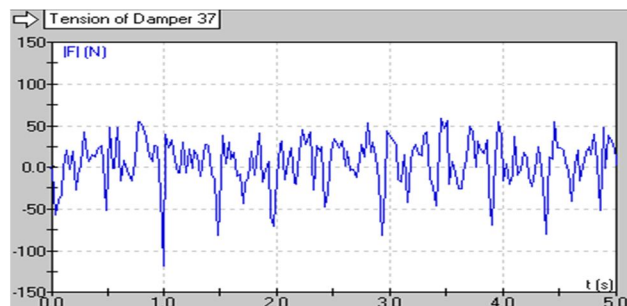


Figura 4.9 Cargas producidas por el amortiguador (F_v)
Fuente: Propia de los autores

Propiedades físicas

Material= Acero

Densidad = 0.0072 gramos por milímetro cúbico

Masa = 20.2969 gramos

Volumen = 2819.0117 milímetros cúbicos

Área de superficie = 1542.3270 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)

$$X = 18.9662$$

$$Y = 0.0000$$

$$Z = 0.0000$$

Límite elástico: $3.51571e+008 \text{ N/m}^2$

Límite de tracción: $4.20507e+008 \text{ N/m}^2$

Cargas y sujeciones

El pasador del mecanismo de giro está sometido a una carga de normal a la superficie como se muestra en la figura 4.10, producida por la tensión del amortiguador. Esta carga se encuentra en la sección donde se conecta con el perno de montaje y está apoyada sobre las orejas que conectan al mecanismo de giro con el pistón del amortiguador.

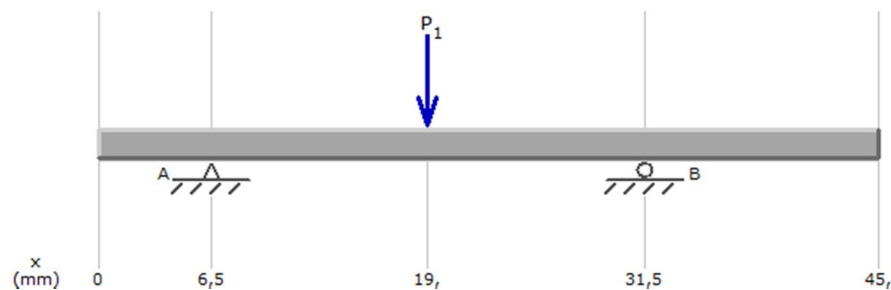


Figura 4.10 Cargas y sujeciones

Fuente: Propia de los autores

El estudio en MDSOLID 3.5, nos permite observar que existe una fuerza cortante de 75 N en cada uno de los apoyos del pasador como se muestra en la figura 4.11.

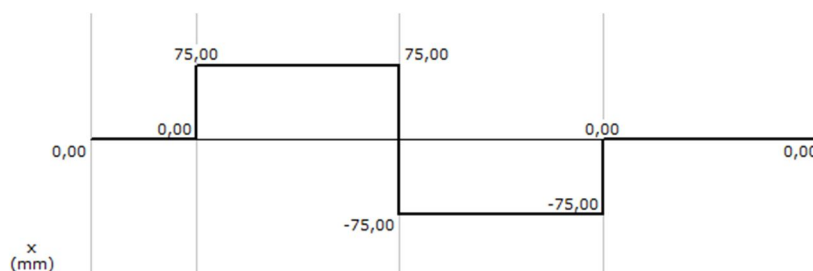


Figura 4.11 Fuerzas cortantes

Asumimos un pasador con un diámetro de 8 mm, a fin de dar un valor que no influya en el aumento de las dimensiones del mecanismo. Además utilizaremos un factor de seguridad para este diseño $F_s = 2$.

—

4.20

Teniendo como límite elástico del acero (material comercial para pernos)

3.51571e+008 —

4.21

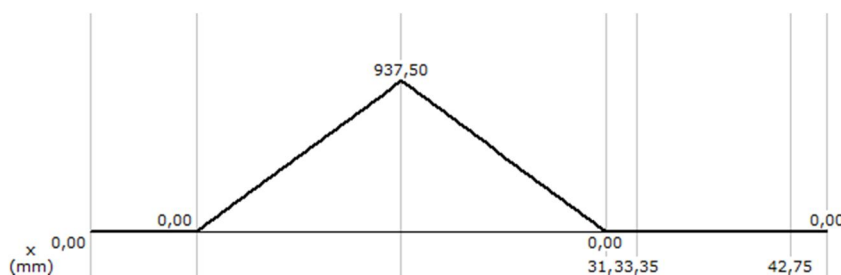


Figura 4.12 Momento producido en el pasador de giro

Fuente: Propia de los autores

Se toma en cuenta además el esfuerzo producido por el momento de flexión en el perno $M= 937,5 \text{ Nmm}$ (figura 4.12), ubicado en la sección donde se encuentra aplicada la carga P1.

$$\sigma_x = \frac{32M}{\pi*d^3} \quad 4.22$$

$$\sigma_x = \frac{32 * 0,9375 \text{ Nm}}{\pi * (0,008)^3 \text{ m}^3}$$

$$\sigma_x = 1,865 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_x = 18,65 \text{ Mpa}$$

Teniendo como límite elástico del acero (material comercial para pernos)

$$3.51571\text{e}+008 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_t > \sigma * Fs$$

$$351,57 \text{ Mpa} > 18,65 \text{ MPa} * 2$$

$$351,57 \text{ Mpa} > 37,3 \text{ MPa}$$

Conclusión

El pasador de giro, está diseñado para soportar estos esfuerzos, sin riesgo a deformarse o romperse, siendo el material de acero, característico de los pernos comerciales comunes y de un diámetro M8.

4.5.2 SIMULACIÓN DE LAS OREJAS

Las orejas forman parte del mecanismo de giro y conectan al pistón del amortiguador MR con el pasador de este mecanismo (figura 4.13). Estos

permiten girar al pasador, brindando al amortiguador MR de un grado de libertad.

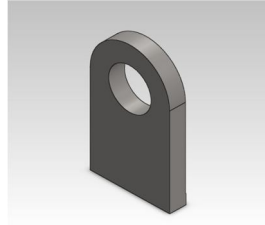


Figura 4.13 Orejas

Fuente: Propia de los autores

Suposiciones

Estas orejas están sometidas a cargas producidas por la tensión del amortiguador y el peso de la masa del sistema. Las cargas se dividen uniformemente para cada una de las orejas, es decir, que se aplica una fuerza $F_v = 75 \text{ N}$.

Propiedades físicas

Material: Acero.

Densidad = 0.01 gramos por milímetro cúbico

Masa = 7.12 gramos

Volumen = 901.78 milímetros cúbicos

Área de superficie = 897.27 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)

$$X = 0.00$$

$$Y = -6.71$$

$$Z = 1.50$$

Límite elástico: $3.51571e+008 \text{ N/m}^2$

Límite de tracción: $4.20507e+008 \text{ N/m}^2$

Cargas y sujeciones

La oreja del mecanismo de giro está sometida a una carga de normal a la superficie (figura 4.14), producida por la tensión del amortiguador. Esta carga se encuentra en el orificio donde se conecta con el perno de montaje y está apoyada en uno de sus extremos, habiendo sido soldada a una tuerca que conecta el mecanismo de giro con el pistón del amortiguador MR.

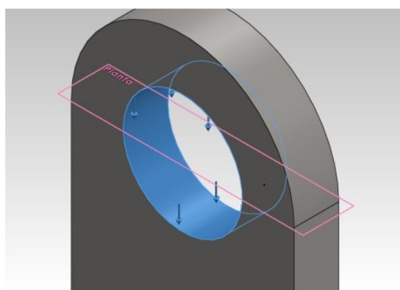


Figura 4.14 Cargas y sujeciones

Fuente: Propia de los autores

Tenemos que el orificio tiene un diámetro de 8 mm, a fin de dar un valor que no influya en el aumento de las dimensiones del mecanismo. Además utilizaremos un factor de seguridad para este diseño $F_s = 2$.

—

4.20

Teniendo como límite elástico del acero (material de la oreja) es $3.51571e+008$ —

4.21

Conclusión

La oreja del mecanismo de giro, está diseñado para soportar estos esfuerzos, sin riesgo a deformarse o romperse, siendo el material de acero.

4.5.3 SIMULACIÓN DE LAS BARRAS SUPERIORES

La estructura cuenta con dos barras en la parte superior, en las cuales se coloca y sujeta el amortiguador, el resorte y la masa del sistema.

Estas barras (figura 4.15) están acopladas al mecanismo de manera que se encuentran fijadas a una posición determinada, y poseen un grado de libertad, que les permite girar conforme al movimiento del sistema, evitando así deformaciones o roturas.

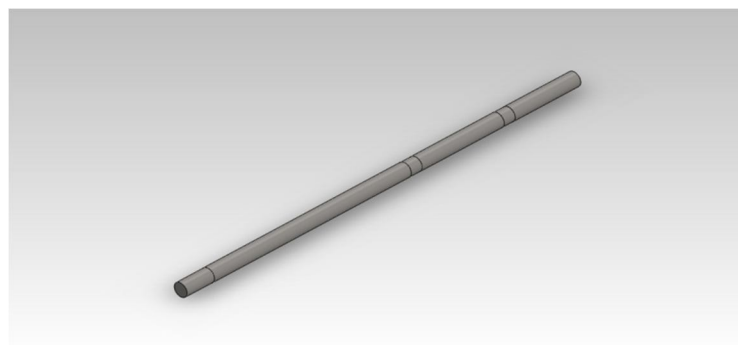


Figura 4.15 Barra superior

Fuente: Propia de los autores

Suposiciones

Este se encuentra sometido a cargas ejercidas en determinadas posiciones de la barra por los elementos que están sujetos. Las cargas se

dividen uniformemente para cada una de las barras, es decir, que se aplica $F_v = 75 \text{ N}$, producida por el AMR; y una $F_k = 50 \text{ N}$, producida por el conjunto masa resorte, siendo este el valor más crítico (Ver Figura 4.16).

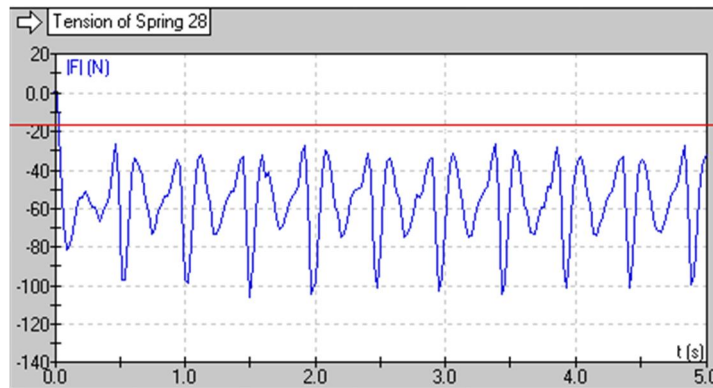


Figura 4.16 Cargas producidas por el resorte (F_k)

Fuente: Propia de los autores

Propiedades físicas

Material = Acero A36 con acabado superficial

Masa = 318.29 gramos

Volumen = 40546.81 milímetros cúbicos

Área de superficie = 13784.55 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)

$$X = 0.00$$

$$Y = 0.00$$

$$Z = 179.75$$

Límite elástico: $2.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$

Límite de tracción: $4 \times 10^8 \text{ N/m}^2$

Cargas y sujeciones

Cada una de las barras superiores está sometida a dos cargas, la primera normal a la superficie, producida por la tensión del amortiguador. Esta carga se encuentra en la sección donde se conecta el perno de montaje del amortiguador a las barras superiores. Y la segunda normal a la superficie, producida por la tensión del conjunto masa-resorte. Esta carga se encuentra en la sección donde se conecta el perno de montaje del resorte, a las barras superiores. Se analizará para el caso en que las barras se encuentran fijadas en un extremo (ver figura 4.17).

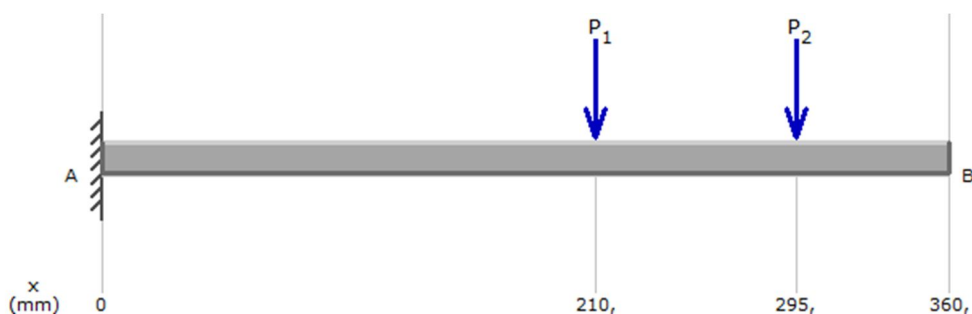


Figura 4.17 Cargas y sujeciones

Fuente: Propia de los autores

El estudio en MDSOLID 3.5, nos permite observar que existe una fuerza cortante de 125 N en la el apoyo del amortiguador como se muestra en la figura 4.18.

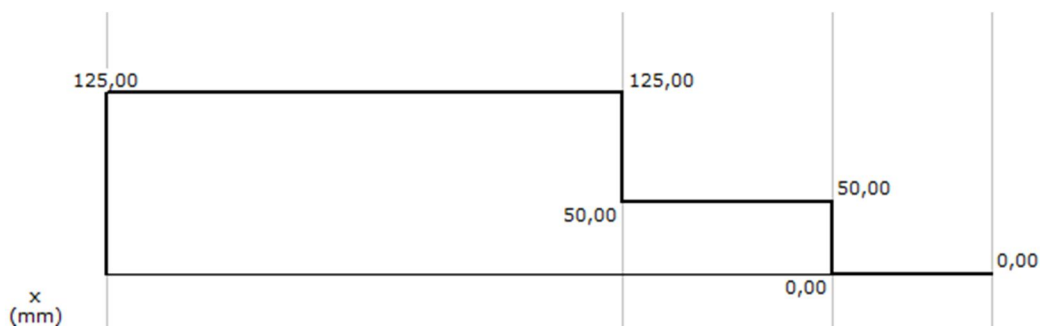


Figura 4.18 Fuerzas cortantes

Fuente: Propia de los autores

Tenemos que el diámetro de las barras superiores es de 12 mm. Además utilizaremos un factor de seguridad para este diseño $F_s = 2$.

Teniendo como límite elástico del acero A36 (material de las barras superiores) $2.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$

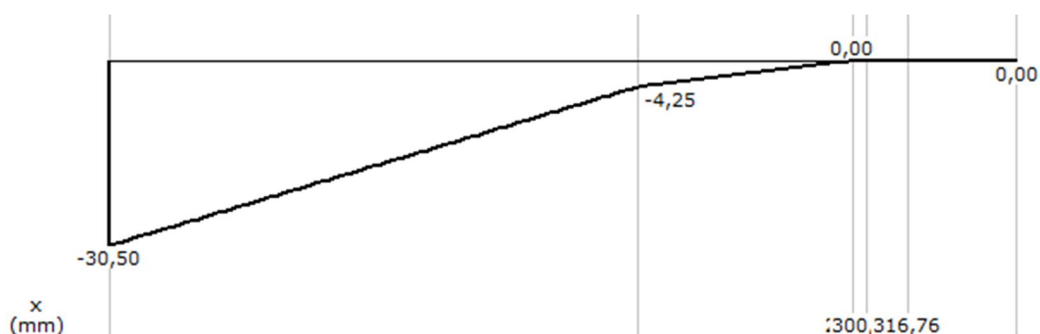


Figura 4.19 Momento producido en la barra superior

Fuente: Propia de los autores

Se toma en cuenta además el esfuerzo producido por el momento de flexión en las barras superiores $M = 30,5 \text{ Nm}$, ubicado en el extremo fijo de la barra (figura 4.19).

$$\sigma_x = 1,798 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_x = 179,8 \text{ MPa}$$

Teniendo como límite elástico del acero A36 (material de las barras superiores) $2.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, Límite de tracción: $4 \times 10^8 \text{ N/m}^2$.

$$\sigma_t > \sigma * Fs$$

$$250 \text{ MPa} > 179,8 \text{ MPa} * 2$$

$$250 \text{ MPa} < 359,5 \text{ MPa}$$

Tenemos que el esfuerzo por flexión, tomando un factor de seguridad $FS=2$, es mayor al límite elástico, pero menor al límite de tracción.

$$400 \text{ MPa} < 359,5 \text{ MPa}$$

Conclusión

El análisis demuestra que cada barra puede resistir a las cargas aplicadas. Se analizó el caso, en el cual, en lugar de tener un grado de libertad, se tiene una sujeción fija en el extremo, aplicándose un esfuerzo por flexión debido a las cargas aplicadas en las barras superiores y utilizando un factor de seguridad $Fs=2$, dicha barra se deformaría sin llegar a romperse, debido a que se supera el límite elástico del material, pero es menor al límite de tracción.

Las dimensiones de la barra son: $L= 310\text{mm}$, diámetro = 12mm con un material de acero A36.

4.5.4 SIMULACIÓN DE LAS BARRAS INFERIORES.

La estructura cuenta con dos barras en la parte inferior, en las cuales se coloca y sujeta el amortiguador, el resorte y la rueda seguidora de la leva.

Estas barras (figura 4.20) están acopladas al mecanismo de manera que se encuentran fijas a una posición determinada, y posee un grado de libertad, que le permite girar conforme al movimiento del sistema, evitando así deformaciones o roturas.



Figura 4.20 Barra inferior

Fuente: Propia de los autores

Suposiciones

La cargas o fuerzas ejercidas por estos elementos, se dividen para cada una de las barras, es decir, que se aplica una fuerza $F_v = 75 \text{ N}$ producida por el AMR y una fuerza $F_k = 50 \text{ N}$ producida por el conjunto masa resorte, en determinadas posiciones de la barra.

Además existe una fuerza de reacción $F_r = 60 \text{ N}$, en la posición donde se coloca la rueda seguidora, producida por la fuerza de empuje de la leva sobre esta.

Propiedades físicas

Material = Acero A36 con acabado superficial.

Masa = 451.17 gramos

Volumen = 57474.02 milímetros cúbicos

Área de superficie = 19440.62 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)

$$X = 0.00$$

$$Y = 0.00$$

$$Z = 254.76$$

Límite elástico: $2.5e+008$ N/m²

Límite de tracción: $4e+008$ N/m²

Cargas y sujeciones

Cada tubo inferior está sometido a dos cargas y y normales a la superficie, producidas por el AMR y el conjunto masa resorte.

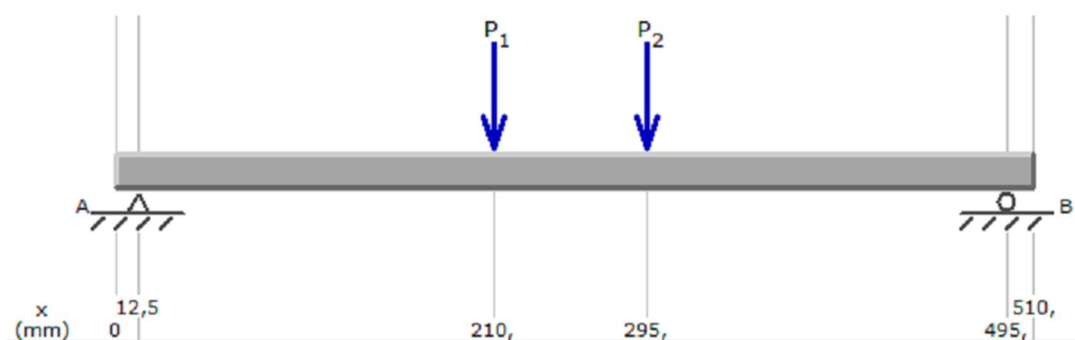


Figura 4.21 Cargas y sujeciones

Fuente: Propia de los autores

El estudio en MDSOLID 3.5, nos permite observar que existe una fuerza cortante de 65,03 N en el apoyo A y una de 59,97 en el apoyo B donde se encuentra colocado el seguidor (ver figura 4.21).

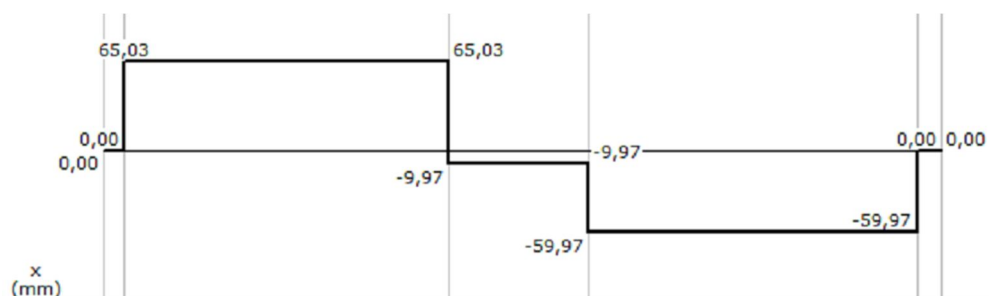


Figura 4.22 Fuerzas cortantes

Fuente: Propia de los autores

Tenemos un tubo con un diámetro de 12 mm. Tomamos como fuerza cortante el valor máximo de 65,03 (ver figura 4.22), porque en este lugar es donde existe más esfuerzo. Además utilizaremos un factor de seguridad para este diseño $F_s = 2$.

—

Teniendo como límite elástico del acero inoxidable recocido $2.5e+008$ N/m²

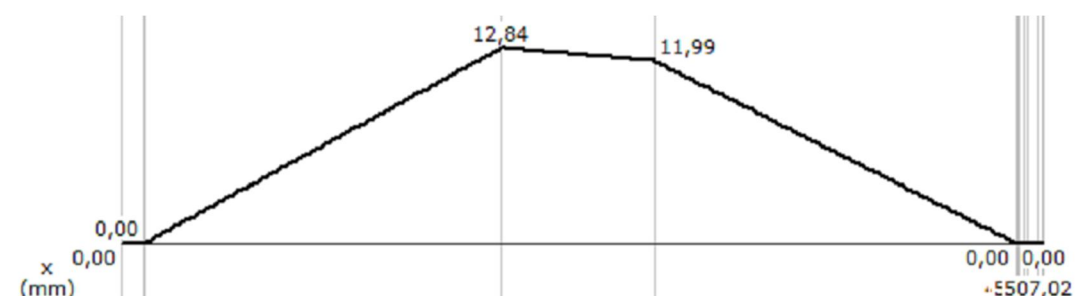


Figura 4.23 Momento producido en la barra inferior

Fuente: Propia de los autores

Se toma en cuenta además el mayor esfuerzo producido por el momento de flexión en el tubo $M = 12,84$ Nm, ubicado en la sección donde se encuentra aplicada la carga P1 como se muestra en la figura 4.23.

$$\sigma_x = \frac{32M}{\pi * d^3}$$

$$\sigma_x = \frac{32 * 12,84 \text{ Nm}}{\pi * (0,012)^3 \text{ m}^3}$$

$$\sigma_x = 7,568 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_x = 75,68 \text{ MPa}$$

Teniendo como límite elástico del acero A36 $2.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$

$$\sigma_t > \sigma * Fs$$

$$250 \text{ MPa} > 75,68 \text{ MPa} * 2$$

$$250 \text{ MPa} > 151 \text{ MPa}$$

Conclusión

El análisis demuestra que cada barra puede resistir a las cargas aplicadas. Inclusive en el caso que no existiese el grado de libertad y se tratara de una sujeción fija en el extremo.

Las dimensiones de la barra son: $L = 510 \text{ mm}$, diámetro = 12 mm con un material de acero inoxidable.

4.5.5 SIMULACIÓN DEL EJE DEL MOTOR

Para el montaje del motor en la estructura metálica, es necesario diseñar un eje (figura 4.24) que transmita correctamente el movimiento del motor hacia la leva, de manera que cumpla con las limitaciones en las dimensiones de la estructura y no tenga una deformación debido a la flexión o al aumento de cargas en la leva.

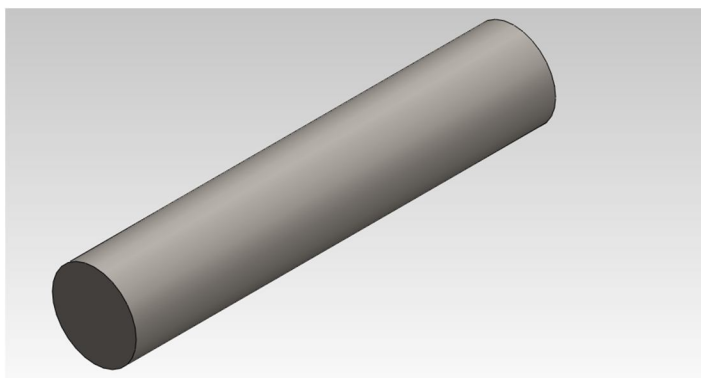


Figura 4.24 Eje del motor
Fuente: Propia de los autores

Suposiciones

Una de las consideraciones importantes es tomar en cuenta las cargas aplicadas en el eje son F_x , F_y , F_z , estas cargas son debido al peso de los componentes, y las cargas del sistema amortiguador, resorte, masa que son transmitidas por la lleva hacia el eje del motor en los plano x-y e x-z. Además del torque aplicado por un motor que tiene potencia de 0,1 Kw. que gira a 60 RPM.

Bajo la consideración de Norton una flecha deberá diseñarse para minimizar la longitud del tramo sujeto a cargas axiales; en base a las dimensiones del conjunto mecánico y a la posición donde se colocó el motor, se tomó la longitud del eje de 90 mm.

Datos:

$$Pot = 0,1 Kw$$

$$Vent = 60 rpm$$

Torque aplicado a partir de la potencia

$$Tpc = \frac{(9550 * Pot)}{Vent} \quad 4.22$$

$$Tpc = 15,917 Nm$$

Propiedades físicas

Material= Acero AISI 1045.

Densidad = 0.01 gramos por milímetro cúbico

Masa = 200 gramos

Volumen = 25268.61 milímetros cúbicos

Área de superficie = 6921.24 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)

$$X = 0.03$$

$$Y = -0.00$$

$$Z = 46.95$$

Límite elástico: 5.3e+008 N/m²

Límite de tracción: 6.25e+008 N/m²

Cargas y sujeciones

En el PLANO X-Y eje del motor está sometido a dos cargas $P_1 = 1,92 N$ y $P_2 = 72,93 N$ normales a la superficie, producidas por el peso de los componentes y la carga del sistema mecánico transmitida por la leva hacia el eje del motor como se muestra en la figura 4.25.

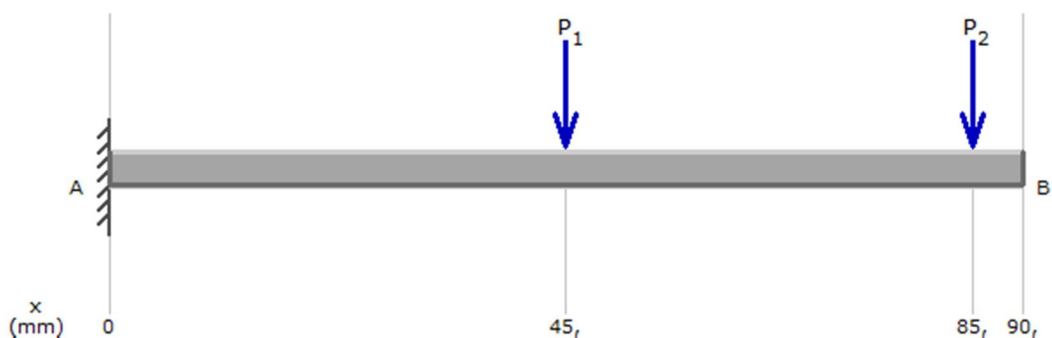


Figura 4.25 Cargas y sujeciones plano X-Y

Fuente: Propia de los autores

Carga por el peso del eje

4.23

Fuerza axial

4.24

El estudio en MDSOLID 3.5, nos permite observar en la figura 4.26 que existe una fuerza cortante de 74,89 N en primer tramo hasta la mitad del eje y una de 72,93 en el segundo tramo hasta el lugar donde se encuentra montada la leva.

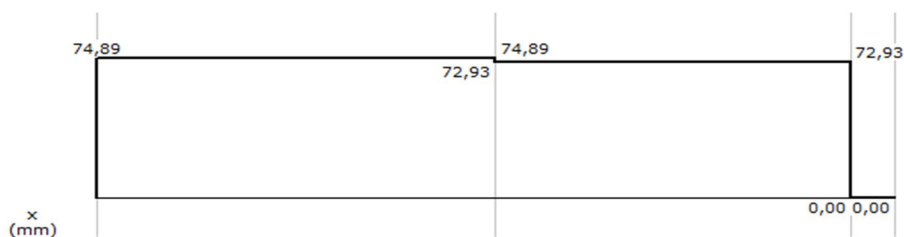


Figura 4.26 Fuerzas cortantes plano X-Y

Fuente: Propia de los autores

Se puede ver en la figura 4.27 del momento producido en el eje del motor, que el mayor momento se produce en la sección en la que el eje es acoplado al motor.

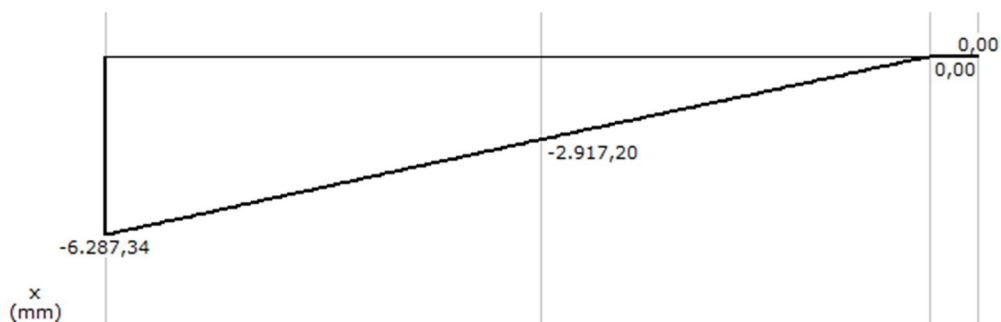


Figura 4.27 Momento producido en el eje plano X-Y

Fuente: Propia de los autores

En el PLANO X-Z eje del motor está sometido a dos cargas y normales a la superficie, producidas por el peso de los componentes y la carga del sistema mecánico transmitida por la leva hacia el eje del motor como se muestra en la figura 4.28.

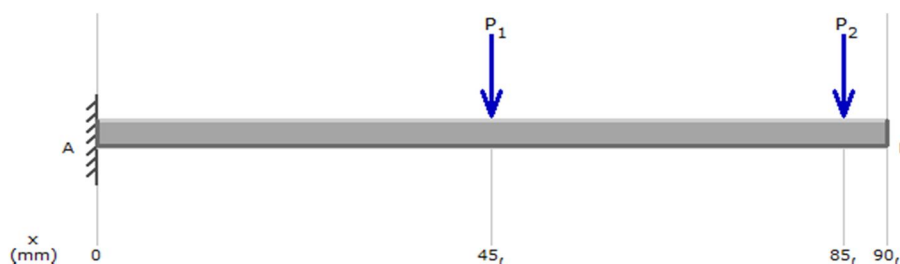


Figura 4.28 Cargas y sujeciones en el plano X-Z

Fuente: Propia de los autores

Fuerza radial

4.25

El estudio en MDSOLID 3.5, nos permite observar en la figura 4.29 que existe una fuerza cortante de 117,28 N en el primer tramo hasta la mitad del eje y una de 115,32 N en el segundo tramo hasta el lugar donde se encuentra montada la leva.

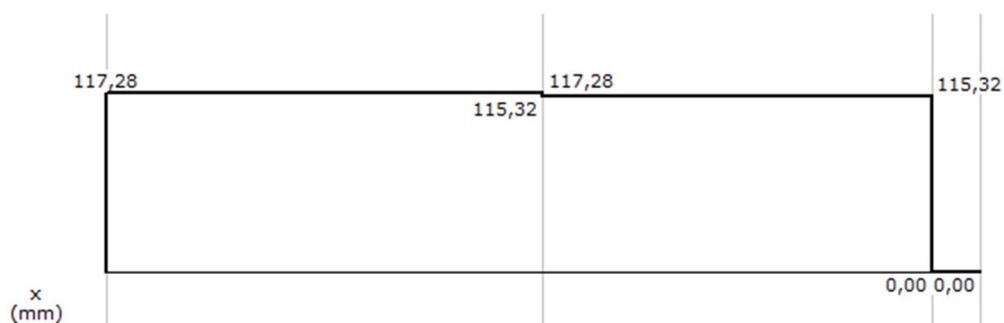


Figura 4.29 Fuerzas cortantes plano X-Z

Fuente: Propia de los autores

Se puede ver en la figura 4.30 del momento producido en el eje del motor, que el mayor momento se produce en la sección en la que el eje es acoplado al motor.

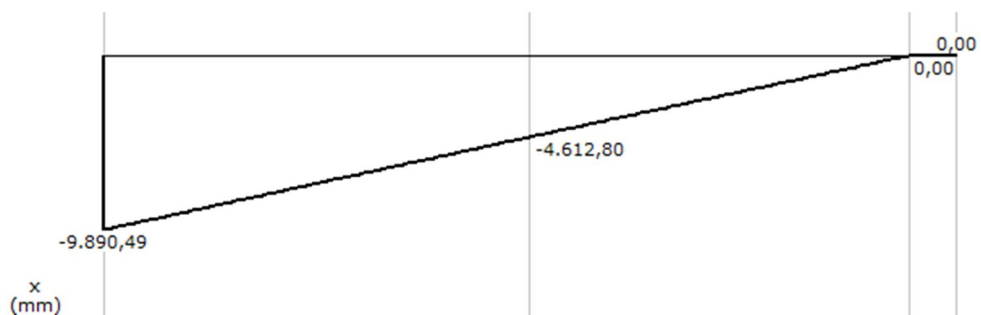


Figura 4.30 Momento producido en el eje plano X-Z

Fuente: Propia de los autores

Se calcula el momento total máximo para el cálculo del área crítica

_____ 4.26

_____ 4.27

Esfuerzo de flexión

_____ 4.28

_____ 4.29

$$\sigma_a = \frac{119378,94}{d^3}$$

Esfuerzo torsional

$$T_{pc} = 15917 \text{ Nmm}$$

$$\tau_{ab} = \frac{16 * T_{pc}}{\pi * d^3} \quad 4.30$$

$$\tau_{ab} = \frac{16 * 15917}{\pi * d^3}$$

$$\tau_{ab} = \frac{81064,61}{d^3} \text{ [Mpa]}$$

$$\tau_{max} = \frac{81064,61}{d^3}$$

$$\tau_{min} = \frac{81064,61}{d^3}$$

$$\tau_m = \frac{81064,61}{d^3} \text{ [Mpa]}$$

$$\tau_a = 0$$

Esfuerzos Reales

Escogimos el valor de concentración de esfuerzo, tomando en cuenta que nuestro material es dúctil (Acero).

$$Kt = 1$$

$$Kt1 = 1,65$$

Tomamos como consideración que el eje es altamente sensible a la muesca.

$$q = 1$$

Por lo tanto:

$$\frac{D}{d} \leq 1,3 \frac{r}{d} \geq 0,1$$

$$Kf = 1 + q(Kt1 - 1) \quad 4.31$$

$$Kf = 1,65$$

$$\sigma_a = Kf * \frac{119378,94}{d^3} = \frac{196975,25}{d^3} [Mpa]$$

$$\tau_m = \frac{81064,61}{d^3} [Mpa]$$

Teoría de fallas de Von Mises.

$$\sigma_{qm} = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_m^2} \quad 4.32$$

$$\sigma_{qm} = \sqrt{3} * \tau_m$$

$$\sigma_{qm} = \frac{140408,02}{d^3}$$

$$\sigma_{qa} = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau_a^2} \quad 4.33$$

$$\sigma_{qa} = \frac{196975,25}{d^3}$$

Factores de corrección de tamaño

Escogemos un material para la flecha para nuestro diseño AISI 1045

$$S_y = 620,55 \text{ Mpa}$$

$$S_u = 103 \text{ ksi}$$

$$S_{e1} = 0,5 * S_u \quad 4.34$$

$$S_{e1} = 51,5 \text{ ksi}$$

$$S_{e1} = 51500 * (6,895 * 10^{-3}) = 355,093 \text{ Mpa}$$

Ese valor debe ser recalculado aplicando varios factores.

$$S_e = C_{carga} * C_{tamaño} * C_{superficie} * C_{confiabilidad} * S_{e1} \quad 4.35$$

C_{carga} : La carga es a flexión, por lo que este valor es igual a 1.

$C_{\text{tamaño}}$: En vista de que no conocemos el tamaño de la pieza, escogemos un valor de 1.

$C_{\text{superficie}}$: Este valor se escoge considerando que la pieza es maquinada.

$$a = 4,51$$

$$b = -0,265$$

$$C_{\text{superficie}} = a(S_u)^b$$

$$C_{\text{superficie}} = a(1 * (6,895 * 10^{-3}))^b$$

$$C_{\text{superficie}} = 0,792$$

$C_{\text{confiabilidad}}$: Se asegura una confiabilidad del 90%, por la tanto se toma un valor de 0,897.

Reemplazando tenemos que:

$$S_e = 1 * 1 * 0,792 * 0,897 * 189,957$$

$$S_e = 252,172 \text{ Mpa}$$

Por lo tanto:

$$\frac{S_y}{FS} = \sigma_{qm} + \frac{S_y}{S_e} * \sigma_{qa} \quad 4.36$$

$$\frac{620,55}{3} = \frac{140408,02}{d^3} + \frac{620,55}{252,172} * \frac{196975,25}{d^3}$$

$$206,85 = \frac{140408,02}{d^3} + \frac{484720,713}{d^3}$$

$$d^3 = \frac{625128,73}{206,85}$$

$$d = 14,46 \text{ mm}$$

En nuestro diseño establecemos un diámetro mínimo de 18 mm para ajustar a efectos de rozamiento y sobrecargas en el eje.

Conclusión

En este diseño se toma un valor de diámetro para el eje de motor $d=18\text{mm}$, para transmitir la potencia del motor al sistema magnetoreológico, debido a las dimensiones requeridas para acoplarse perfectamente a la 'manzana' de la leva.

Se comprueba satisfactoriamente que estos valores de diámetro con un material acero AISI 1045, resisten adecuadamente a las cargas aplicadas sobre el eje, evitando cualquier deformación o desalineamiento del eje del motor.

4.5.6 SIMULACIÓN DE LA LEVA

El mecanismo leva-seguidor, transmite el movimiento del motor al sistema mecánico, a manera de oscilaciones controladas en frecuencia y velocidad. La leva que se encuentra montada en el sistema, está fabricada en acero con terminado superficial de cromo (figura 4.31).

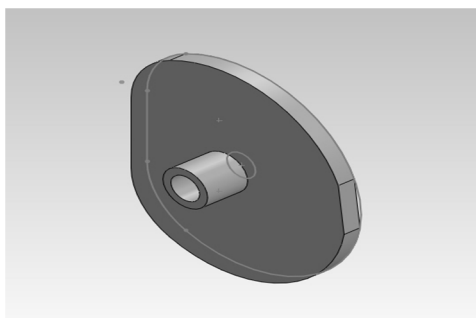


Figura 4.31 Leva

Fuente: Propia de los autores

La leva posee el siguiente diagrama de desplazamiento vs tiempo mostrado en la figura 4.32.

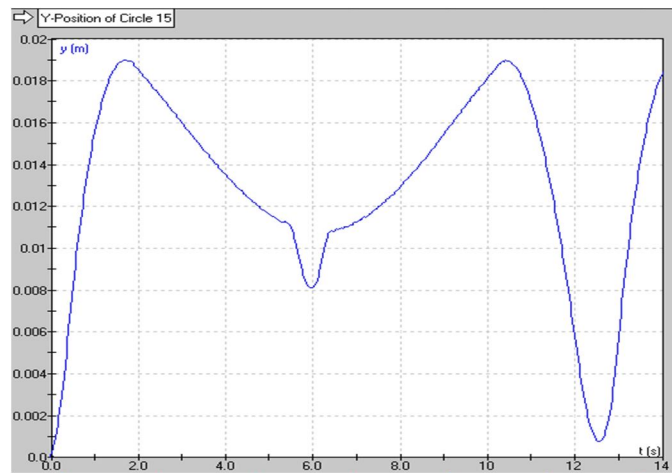


Figura 4.32 Diagrama de desplazamiento vs tiempo de la leva

Fuente: Propia de los autores

Suposiciones

La leva está sometida principalmente a las cargas transmitidas del sistema magnetoreológico, por la barra inferior, a través de la rueda seguidora. , $P_y = 60$, $z = 102,39$, en los ejes y, z. Además que recibe un esfuerzo de torsión transmitido por el eje del motor.

Propiedades físicas

Material= Acero A36 con recubrimiento de cromo.

Masa = 1342.81 gramos

Volumen = 171058.44 milímetros cúbicos

Área de superficie = 41231.08 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)

$$X = 4.12$$

$$Y = -0.02$$

$$Z = 5.91$$

Límite elástico: $2.5e+008 \text{ N/m}^2$

Límite de tracción: $4e+008 \text{ N/m}^2$

Cargas

El esfuerzo de torsión transmitido por el eje del motor es:

$$\tau_m = \frac{81064,61}{d^3} [\text{Mpa}]$$

Siendo el diámetro $d = 18\text{mm}$, tenemos un esfuerzo por torsión máximo ubicado en la sección donde se encuentra montada la leva.

$$\tau_m = \frac{81064,61}{(18)^3} [\text{Mpa}]$$

$$\tau_m = 13,9 [\text{Mpa}]$$

Teniendo como límite elástico del acero AISI A36 $2.5e+008 \text{ N/m}^2$

$$\sigma_t > \sigma * Fs$$

$$250 \text{ MPa} > 13,9 \text{ MPa} * 2$$

$$250 \text{ MPa} > 27,8 \text{ MPa}$$

Conclusión

La leva soporta adecuadamente las cargas aplicadas sobre sí, sin dar lugar a la deformación o al agrietamiento producto de probables choques, debido a su acabado superficial.

CAPITULO 5

SISTEMA ELECTRÓNICO Y DE CONTROL

5.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO

El sistema electrónico consta de ciertos dispositivos electrónicos como sensores, actuadores y un controlador; que brindan al sistema la capacidad de adquirir datos acerca del movimiento oscilatorio del sistema y de la cantidad de voltaje e intensidad eléctrica con el que está funcionando el electroimán; generan el movimiento oscilatorio y el campo magnético, en el caso del motor y el electroimán; permiten almacenar y transferir datos, de acuerdo a la necesidades que se requiera. A continuación se describirá los dispositivos adquiridos de acuerdo a las condiciones que presentaba el sistema.

5.1.1 MOTOR

El motor, es el elemento encargado de generar el movimiento oscilatorio del sistema a través del conjunto leva seguidor. Su selección se basó en ciertos requerimientos, a fin de obtener un funcionamiento adecuado.

Tipo: Eléctrico Monofásico 110v

Potencia Nominal: 100 w

Velocidad: 60 RPM

Sentido de giro: Horario

Servicio: Intermitente

5.1.2 CONTROLADOR

Para la selección del controlador, se tomó las siguientes consideraciones:

- La capacidad de adquisición de señales, principalmente la señal proveniente del sensor Sharp GP2D120X.
- La capacidad de enviar señales digitales y PWM, para controlar los dispositivos electrónicos que forman parte del sistema.
- La compatibilidad con los demás componentes electrónicos, en cuanto al voltaje de trabajo.
- La alimentación requerida para su funcionamiento.
- La interfaz de comunicación con la PC.
- El lenguaje de programación.
- La robustez, para un funcionamiento continuo, sin que se produzca el reseteo del mismo.
- El precio.
- La posibilidad de acoplar más dispositivos electrónicos, para la ampliación de los límites del proyecto que puede darse en un futuro.

El Arduino Mega 2560 es una placa electrónica, que se acopla perfectamente a los requerimientos de nuestro proyecto.

5.1.2.1 Características de la placa Arduino Mega 2560

A continuación se detallan las características principales de la placa arduino mega 2560 (ARDUINO, 2013) y se pueden observar sus componentes en la figura 5.1.

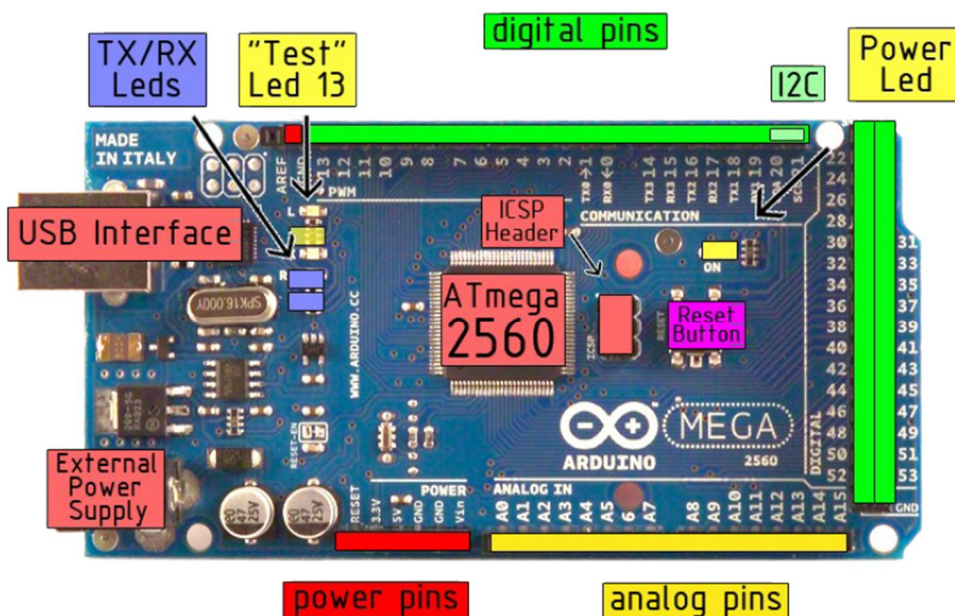


Figura 5.1 Arduino Mega 2560

Fuente: (ARDUINO, 2013)

- Tiene 54 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 15 se pueden utilizar como salidas PWM).
- Posee 16 entradas analógicas
- Posee comunicación por puerto serial
- Un oscilador de 16MHz.
- Conexión USB, lo que facilita la comunicación con el PC, además de alimentar a la placa cuando se encuentra conectado.
- Un conector de alimentación.
- Un botón de reinicio.

- Brinda protecciones a todo el circuito, evitando también los picos que se pueden producir por las conexiones a tierra y la generación de ruidos al momento de la lectura de las señales analógicas.
- Posee pines de poder, de los cuales podemos obtener la alimentación para el sensor, en este caso el sensor de distancia; un pin que nos da 5v, y múltiples puntos de tierra para realizar la conexión de todos los elementos.

5.1.3 SENSOR SHARP GP2D120X

Es un sensor IR (figura 5.2) que tiene un rango de actuación de 4 a 40 cm. Envían un valor analógico de voltaje, que varía en función de la distancia al objeto que se encuentra dentro de su rango de alcance.



Figura 5.2 Sensor Sharp GP2D120X

Fuente: (Llorente, 2010)

5.1.3.1 Funcionamiento

Un pulso de luz infrarroja se emite por el diodo emisor. La luz viaja por el "campo de visión" y puede chocar con un objeto, o simplemente continúa. En caso de no haber objeto, la luz nunca sería reflejada y el lector mostraría que no hay objeto. Si la luz es reflejada por un objeto, retorna al detector y crea un triángulo entre el punto de reflexión, el emisor y el detector, como se puede ver en la figura 5.3.

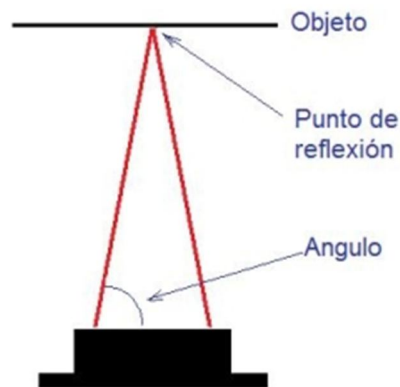


Figura 5.3 Funcionamiento Sensor Sharp
Fuente: (Llorente, 2010)

Los ángulos en este triángulo varían basándose en la distancia al objeto. Si el objeto está lejos, el ángulo es mayor, que si el objeto está más cerca. La parte receptora de estos sensores son realmente unas lentes de precisión que distribuyen la luz reflejada sobre la superficie de la matriz CCD lineal de una manera proporcional al ángulo del triángulo descrito anteriormente. La matriz CCD puede entonces determinar en qué ángulo la luz ha sido reflejada y por tanto, puede calcular la distancia al objeto (Llorente, 2010).

Este método de medida es casi inmune a la interferencia de luz ambiental y ofrece una asombrosa indiferencia al color del objeto que es detectado. Con estos sensores es posible detectar una pared negra a plena luz del sol.

5.1.3.2 Características

- Salida analógica (Vo)
- Alimentación a +5v
- Rango efectivo de medida de 4 a 40 cm
- Tiempo típico de respuesta 39ms

- Retardo típico de comienzo 44ms
- Consumo medio 33mA

La siguiente figura 5.4 muestra los valores de salida del sensor GP2D120X (en V.) en función de la distancia al objeto (en cm.):

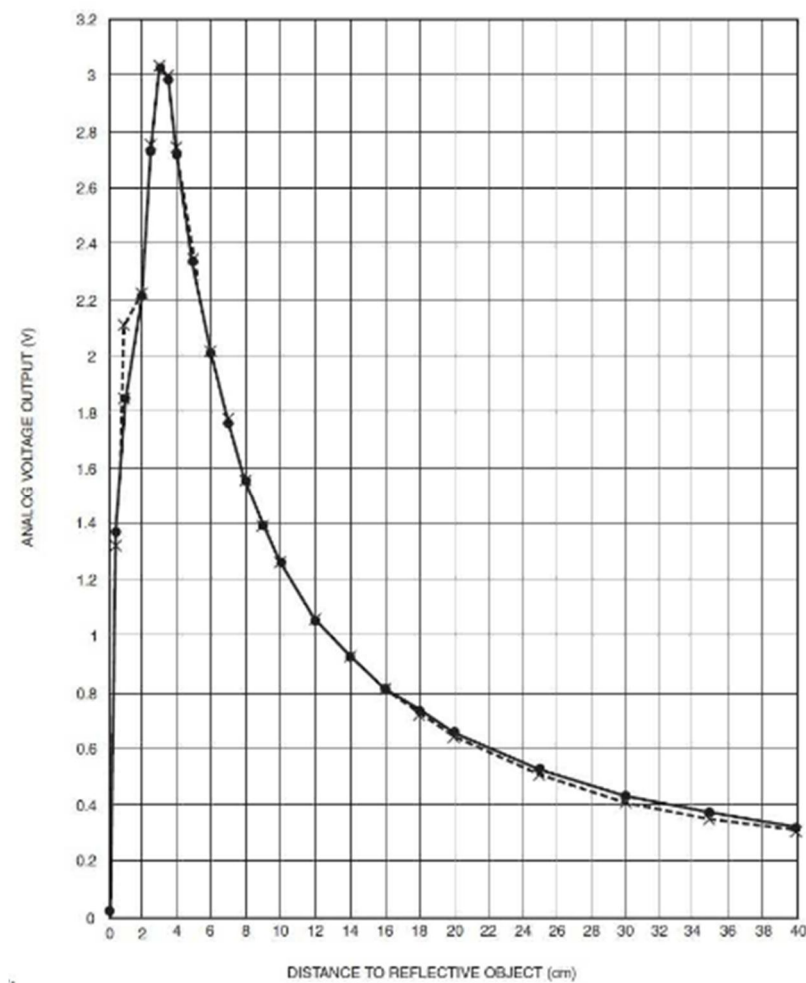


Figura 5.4 Curva característica de los valores de salida del sensor GP2D120X

Fuente: Datasheet GP2D120X

En la gráfica hay dos zonas marcadas; la primera zona, que abarca desde los 4 cm. de distancia entre objeto y sensor, hasta los 40 cm. que es la distancia máxima especificada para este sensor entre sus características.

Esta zona, como se puede ver, tiene una curva con forma logarítmica en lugar de lineal.

Según las propias hojas del fabricante la diferencia de voltaje proporcionada entre los 4cm y los 40cm puede variar entre 0,35 V. a 2,75 V.

La segunda zona de la gráfica, que está por debajo de los 4 cm. pertenece al rango de distancias en las cuales los valores de salida que el sensor nos proporciona comienzan a caer, y pueden llegar a ser confundidos con distancias mayores. Por tanto, es conveniente evitar que en este rango de distancias, se realicen mediciones, siempre que sea posible.

5.1.3.3 Montaje

Se montará el sensor, en una placa que está adherida a la barra transversal “G”, la cual se encuentra fija en la estructura. El emisor y el receptor del sensor apuntarán hacia una placa que esta fija a las barras superiores; la misma que transmite las oscilaciones del sistema y permite una fácil detección. La conexión del sensor, es muy sencilla y se muestra en la figura 5.5.

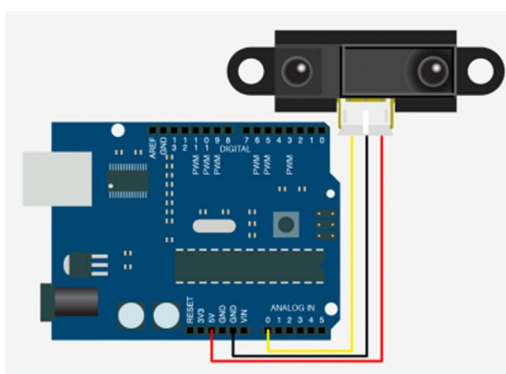


Figura 5.5 Conexión del sensor Sharp GP2D120X
Fuente: (ARDUINO, 2013)

5.1.4 TARJETA DE RELÉS DE 4 CANALES

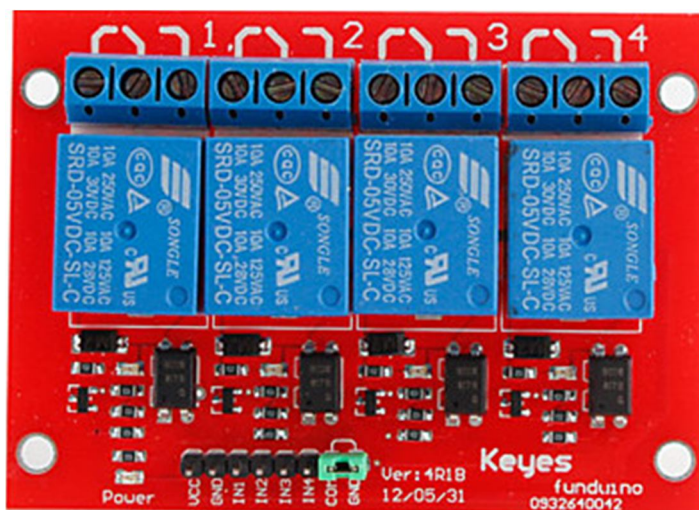


Figura 5.6 Tarjeta de relés de 4 canales

Fuente: (ARDUINO, 2013)

Esta tarjeta (figura 5.6) está equipada con relés de alta intensidad, AC 250v 10A y DC30v 10A; permite controlar varias aplicaciones, y otros equipos con la corriente grande.

Para nuestro proyecto utilizamos una tarjeta de relés de 4 canales con toda la circuitería necesaria para su funcionamiento, de tal forma, que solo basta unirla a una fuente de energía a 5 voltios y conectar las pines de entrada de cada relé para que funcionen de acuerdo con las señales que lleguen desde los PINs de salida de Arduino.

Se puede conectar directamente al PIN de 5V y al PIN GND de la placa Arduino; pero esto puede producir reseteos o causar interferencia en las señales de control que recibe de la interfaz con labview; por lo tanto, para evitar esto se utilizó un módulo regulador de voltaje de 12v DC- 5v DC. (Ver figura 5.7).

Hay conectores marcados como IN1, IN2, IN3 y IN4, COM, para conectarse a los cuatro salidas digitales y una referencia de tierra (GND) que posee el Arduino, que serán quienes controlen la activación de los relés, en donde se encuentran conectados los circuitos eléctricos para el motor (IN4) y la luz indicadora (IN3).

5.1.5 MÓDULO REGULADOR DE VOLTAJE DC-DC



Figura 5.7 Módulo regulador de voltaje

Fuente: (ARDUINO, 2013)

Es una fuente regulable de alta eficiencia, armada, de pequeño tamaño y bajo peso ideal para alimentar módulos GSM/GPRS, módulos controladores de motores de DC o paso a paso, y para uso general (figura 5.7).

La tensión de entrada va de 4.5-35V y la tensión de salida es ajustable desde 1.25-30 V, la tensión de salida máxima no superara la tensión de entrada (modo step-down). La corriente de salida es de 2A nominal, con un máximo 2.5A.

5.1.6 TARJETA DE CONTROL DE VOLTAJE



Figura 5.8 Tarjeta de control de voltaje

Fuente: <http://www.dimensionengineering.com/products/syren10>

Esta placa (figura 5.8) viene equipada con un circuito que permite controlar el voltaje que circula a través de una carga conectada. Se la utiliza para el control de velocidad y de giro de los motores DC o de algún dispositivo que funcione con un voltaje de 12v DC con un máximo de 10A.

Por lo tanto se conectará el electroimán a las salidas M1 y M2; y la fuente de alimentación de 12v en las entradas B+ y B-, tomando en cuenta la polaridad.

El Pin de control S1 puede recibir una señal PWM que proviene de la tarjeta Arduino, la cual permite variar el voltaje que ingresa al electroimán, de acuerdo a lo requerido para este proyecto.

5.1.7 CIRCUITOS DE POTENCIA Y CONTROL

Se realizó un circuito de potencia y de control para controlar los dispositivos, electrónicos de manera que se puedan adquirir y transmitir las señales provenientes del sensor, activar o desactivar por medio de señales digitales al motor y a la luz indicadora, y controlar el voltaje del electroimán

por medio de una señal PWM. Además tendrá un interfaz con la PC por medio de una conexión USB.

5.1.7.1 Circuito de potencia

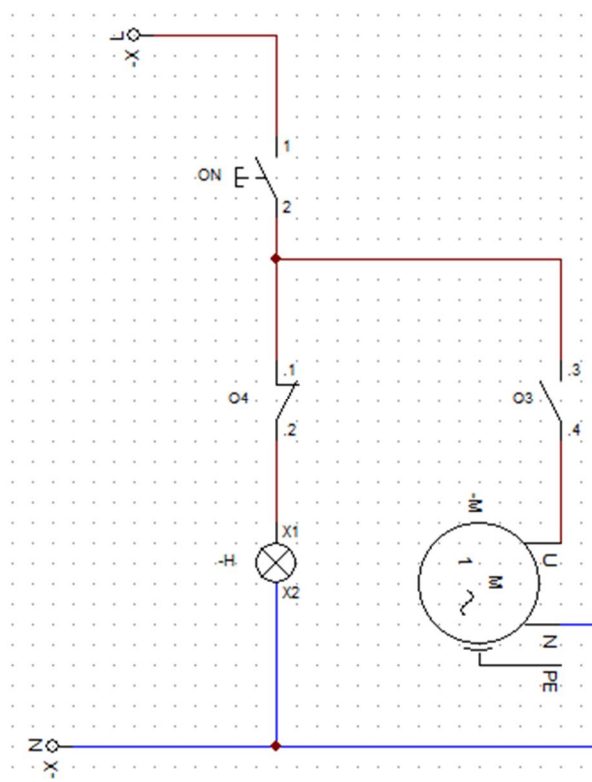


Figura 5.9 Circuito de potencia

Fuente: Propia de los autores

El circuito de potencia de la figura 5.9 se describe a continuación:

Switch de encendido (ON): Permite energizar a todo el circuito de potencia.

Contactos (O3, O4): Se encargan de activar a la luz indicadora y al motor que inicia el movimiento del sistema. La señal de activación de estos contactos proviene de la placa controladora.

Luz indicadora (H): Se encuentra encendida cuando el sistema está energizado y permanece en estado de intermitencia mientras el motor está funcionando.

Motor (M): El motor genera las el movimiento de entrada del sistema.

5.1.7.2 Circuito de control

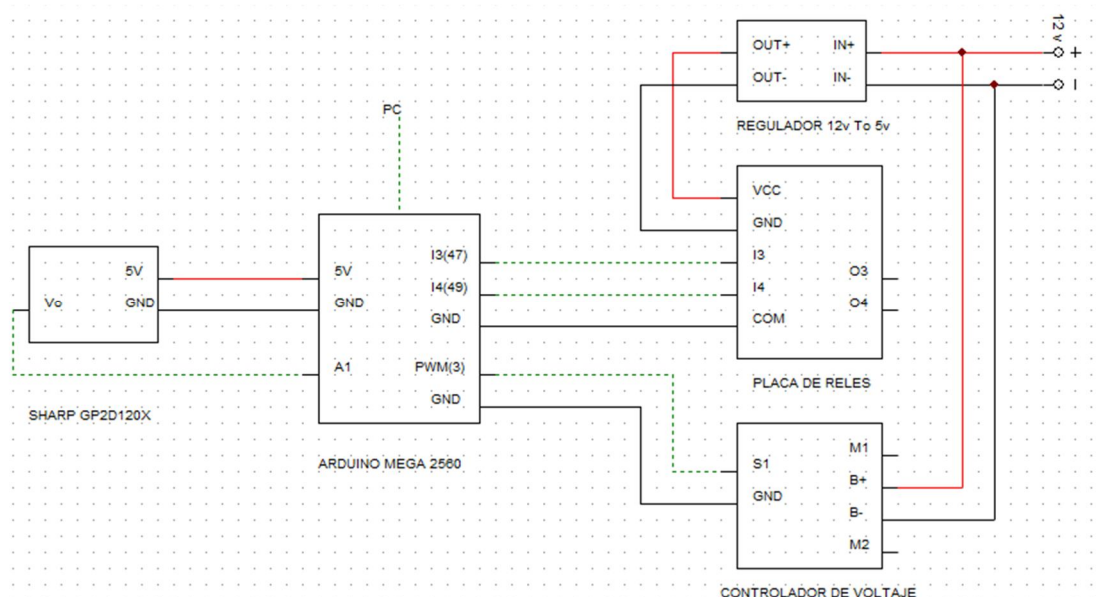


Figura 5.10 Circuito de control

Fuente: Propia de los autores

El circuito de control de la figura 5.10 se describe a continuación:

Sensor SHARP GP2D120: Nos permite obtener las oscilaciones producidas en el sistema, al enviar una señal analógica a la entrada analógica (A1) del controlador, que corresponde al desplazamiento realizado por las barras superiores. Este sensor está alimentado por la fuente de 5V que posee el controlador y su respectiva conexión a tierra.

Controlador Arduino Mega 2560: Recibe la señal proveniente del sensor y la envía por medio de una conexión USB, hacia la PC, en donde la

señal es procesada y analizada; envía señales digitales a través del pin 47 y 49 hacia la placa de relés para activar la luz indicadora y el motor; y envía una señal PWM por el pin 3 hacia la placa controladora de voltaje, para el funcionamiento del electroimán. El controlador esta alimentado por la computadora a través del cable USB.

Placa de Relés: Se encarga de activar los contactos, un normalmente abierto para el funcionamiento del motor (O4), y un contacto normalmente cerrado para la luz indicadora (O3); esto a través de la señal digital que llega a los pines I3, I4. Se debe conectar el pin COM de la placa a un pin GND del controlador.

La alimentación de esta placa viene del regulador de voltaje, a fin de evitar problemas de reseteos debido a la activación de los relés.

Controlador de voltaje: Se encarga de controlar el voltaje que ingresa al electroimán, para esto se debe conectar al electroimán en los terminales M1 y M2 de la placa, además de conectar una alimentación de 12 v DC en los terminales B+ y B-, teniendo en cuenta la polaridad. El control se lo realiza a través del pin S1 que recibe la señal PWM del controlador.

5.2 SISTEMA DE CONTROL

5.2.1 OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA

Determinamos la función de transferencia del sistema magnetoreológico, analizando el comportamiento y la configuración que posee el sistema que

se muestra en la figura 5.11. En este análisis se toma en cuenta la constante de elasticidad (k), las constantes de amortiguamiento (c_0 , c_1 , c_2), y la masa, cuyos valores fueron obtenidos previamente.

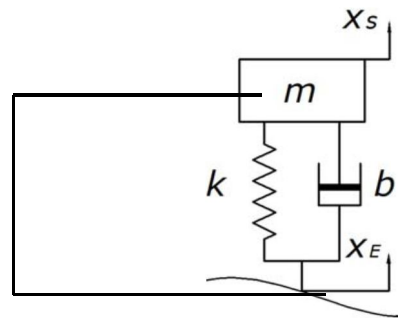


Figura 5.11 Sistema
Fuente: Propia de los autores

Se analizará el comportamiento del sistema en el tiempo, ante una entrada de escalón unitario y se determinarán las amplitudes, el sobrepaso y

el tiempo de asentamiento que puede llegar a tener el sistema, a diferentes constantes de amortiguamiento (c_0 , c_1 , c_2).

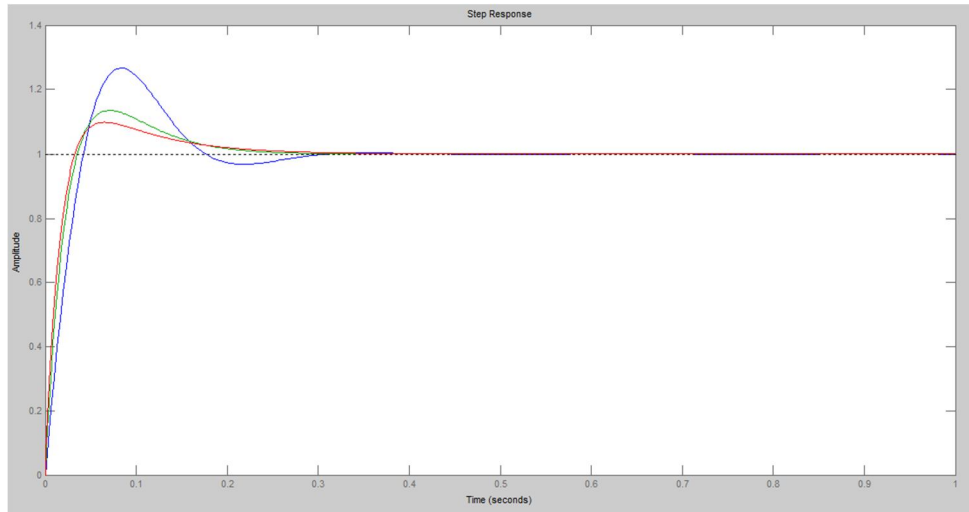


Figura 5.12 Comportamiento del sistema a diferentes constantes de amortiguamiento

Fuente: Propia de los autores

Como se puede ver en la figura 5.12, existe una diferencia de las respuestas del sistema; a medida que se utiliza un FMR con mayor porcentaje de partículas metálicas, el sistema se estabiliza en un tiempo más corto y con un menor porcentaje de sobrepaso.

El comportamiento de un sistema con un coeficiente de amortiguamiento

, se muestra su en el figura 5.13.

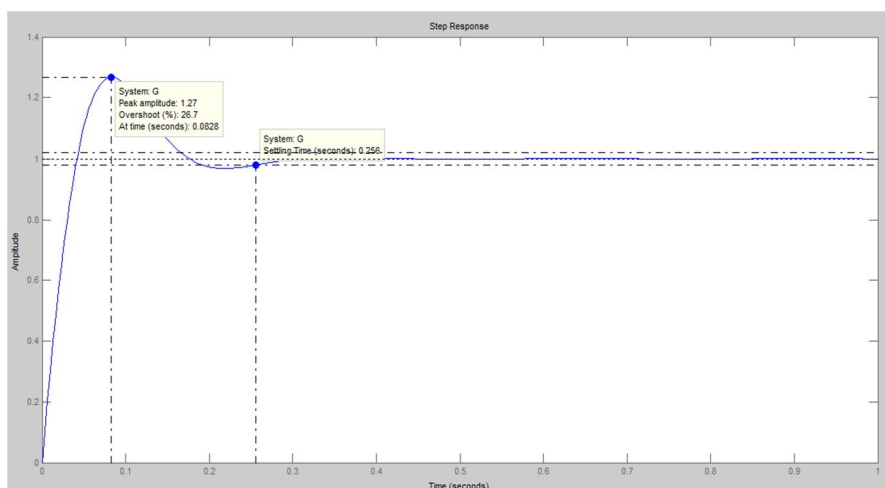


Figura 5.13 Comportamiento de un sistema con un coeficiente de amortiguamiento

Fuente: Propia de los autores

Se trata de un sistema subamortiguado, que presenta oscilaciones en su respuesta transitoria, con un sobrepaso de 26,7%, y un tiempo de asentamiento de 0,25 s; lo que indica que el sistema se estabiliza rápidamente, a pesar de que presenta un valor de sobrepaso alto.

En la figura 5.14, se muestra el comportamiento del sistema con un coeficiente de amortiguamiento

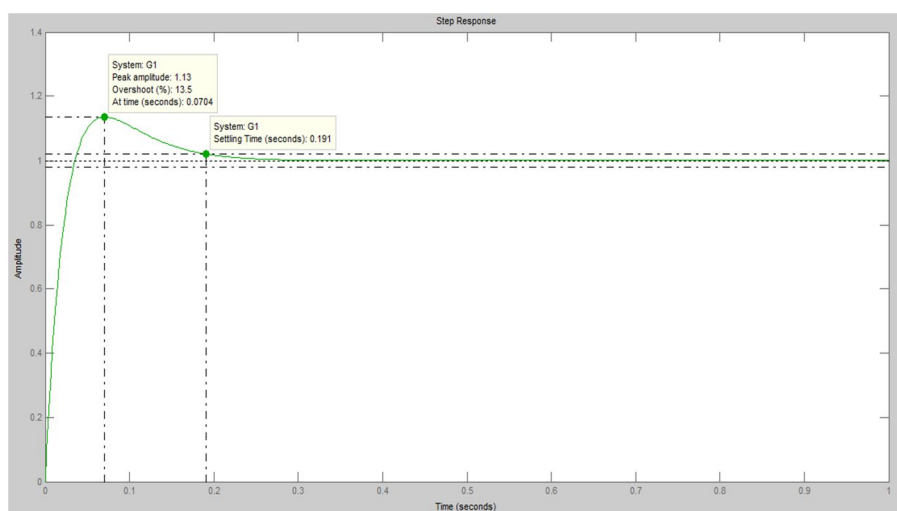


Figura 5.14 Comportamiento de un sistema con un coeficiente de amortiguamiento c_1

Fuente: Propia de los autores

En este caso se tiene un sistema críticamente amortiguado (), las oscilaciones se reducen en su respuesta transitoria, así también como el sobrepaso, que se reduce a un 13,5% y un tiempo de asentamiento de 0,19 s. Este sistema se estabiliza rápidamente y presenta oscilaciones amortiguadas.

Finalmente se muestra en la figura 5.15, un sistema con un coeficiente de amortiguamiento

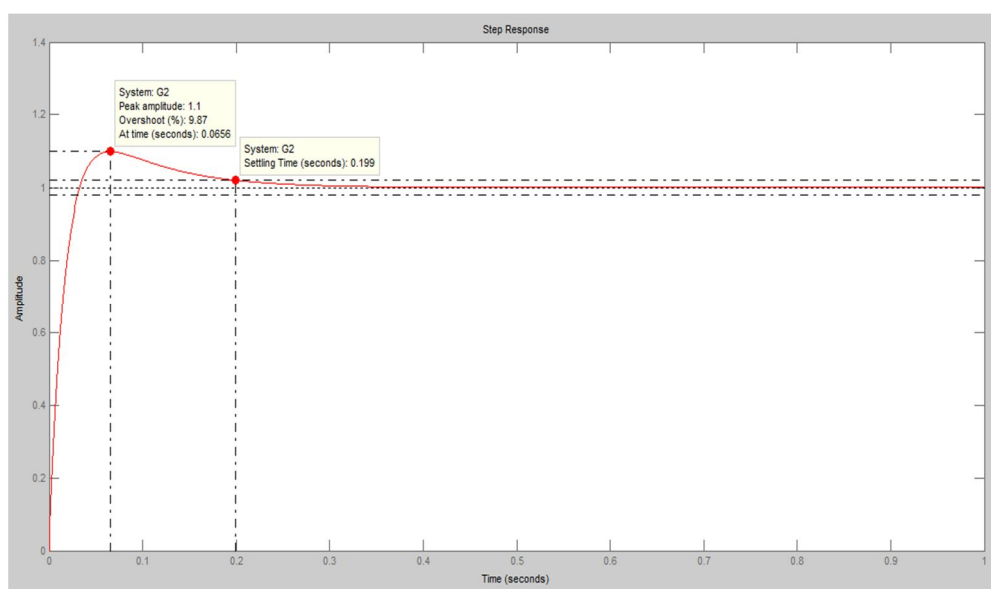


Figura 5.15 Comportamiento de un sistema con un coeficiente de amortiguamiento c_2

Se tiene un sistema sobreamortiguado, con oscilaciones reducidas en su respuesta transitoria, con un sobrepaso de 9,87% y un tiempo de asentamiento de 0,19 s. Este sistema se estabiliza rápidamente y presenta oscilaciones amortiguadas.

5.2.2 DISEÑO DE LA INTERFAZ GRÁFICA

Se realizó una interfaz gráfica para control y visualización de los parámetros del sistema, de manera que se pueda controlar el voltaje que ingresa al electroimán, visualizar las oscilaciones del sistema, analizar el comportamiento del FMR a diferentes entradas de voltaje y determinar el porcentaje de reducción en las oscilaciones.

Para esto se utiliza el software LabVIEW y un Toolkit para Arduino (LIFA), el cual es una herramienta gratuita que permite adquirir datos del controlador Arduino y procesarlos en el entorno de programación gráfica de LabVIEW. (Graphical User Interface GUI). La instalación y configuración del controlador Arduino se indica en el Anexo A-5.2.

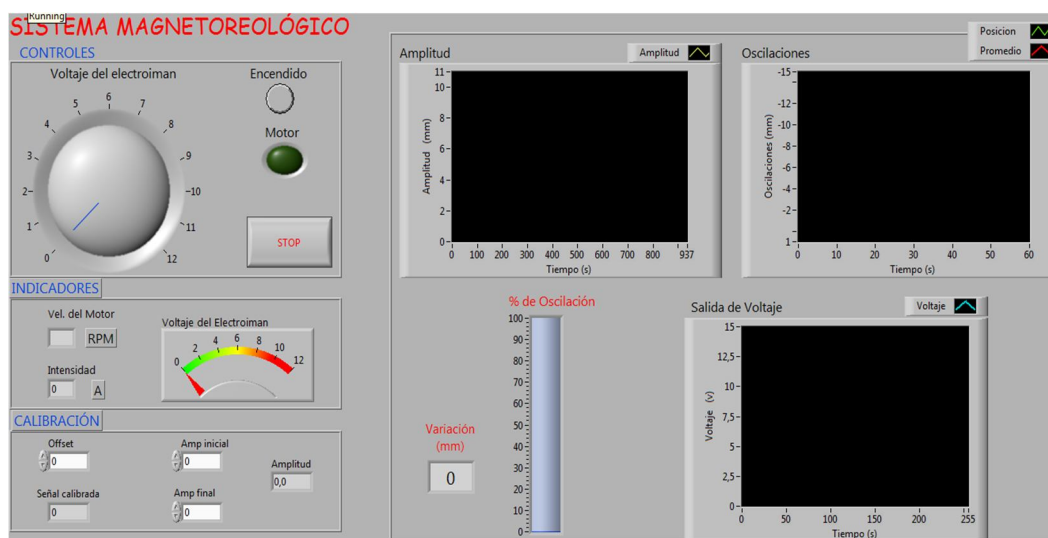


Figura 5.16 Interfaz gráfica del sistema magnetoreológico

Fuente: Propia de los autores

La interfaz gráfica del sistema magnetoreológico, que se muestra en la figura 5.16, está compuesto por varios segmentos:

Controles: Posee los controles para activar el sistema; un botón para encender el motor; un dial que nos permite regular el voltaje que ingresa en

el electroimán y un botón de STOP, para detener el programa y desactivar el sistema (figura 5.17).

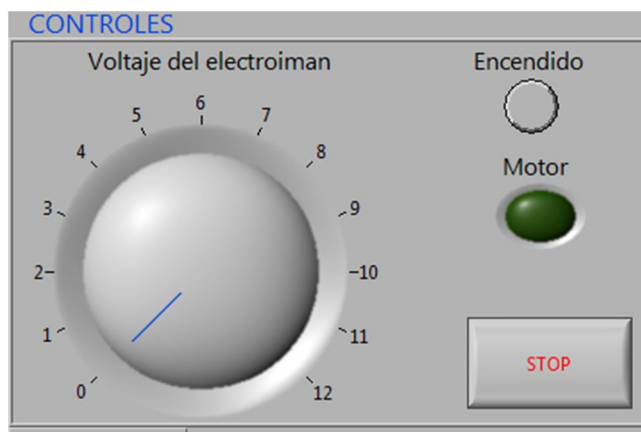


Figura 5.17 Controles

Fuente: Propia de los autores

Indicadores: Muestra los valores de la velocidad del motor en RMP, la intensidad en amperios y el voltaje que ingresa al electroimán (figura 5.18).



Figura 5.18 Indicadores

Fuente: Propia de los autores

Calibración: Permite calibrar la señal recibida por el sensor de distancia, debido factores externos o por algún cambio en la posición inicial, es necesario realizar la corrección utilizando el offset para “encerar” el valor de la señal calibrada, al momento de comenzar a realizar las pruebas. Además permite ajustar los valores de la amplitud inicial (antes de encender el sistema) y la amplitud final (cuando el sistema está activado), para

determinar el rango y el porcentaje de variación de las oscilaciones que se producen en el sistema (figura 5.19).

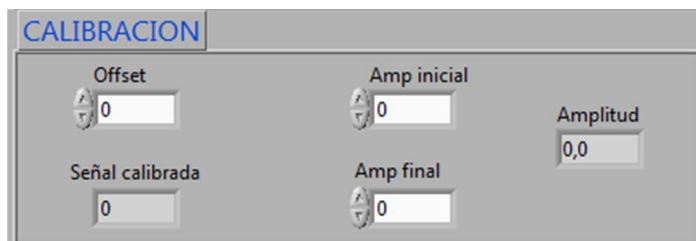


Figura 5.19 Calibración

Fuente: Propia de los autores

Gráficas: Esta sección muestra las gráficas de las oscilaciones del sistema, la variación de la amplitud de las oscilaciones, la variación del voltaje que ingresa al electroimán, y el porcentaje de oscilaciones del sistema (figura 5.20).

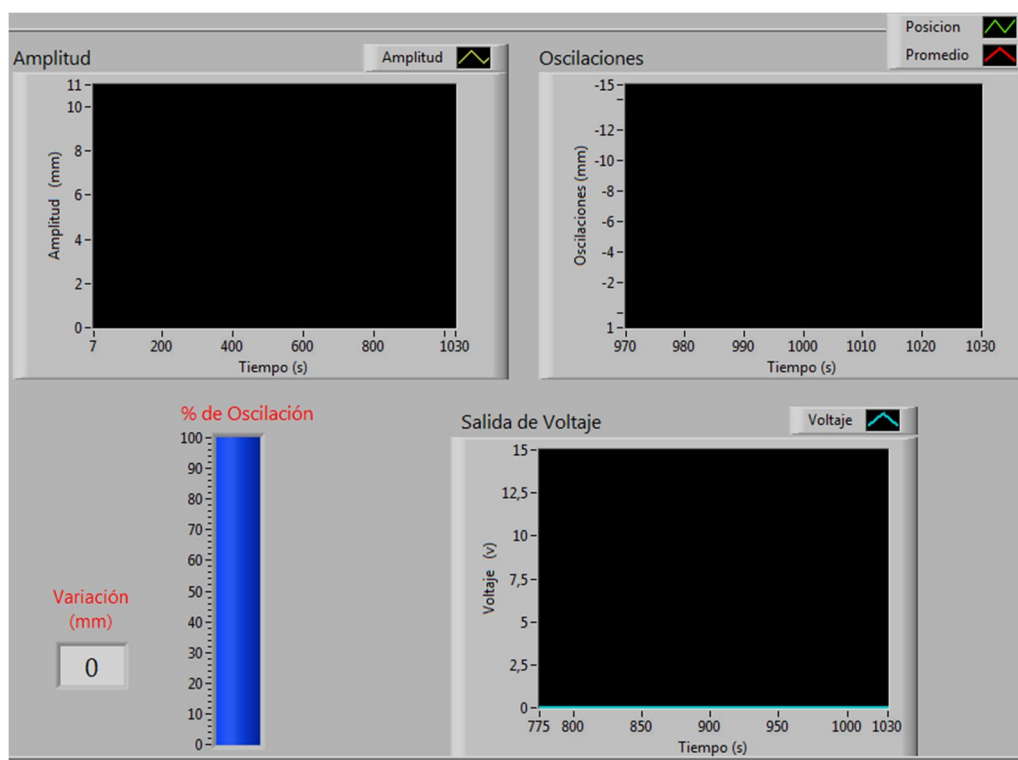


Figura 5.20 Gráficas

Fuente: Propia de los autores

5.2.3 DISEÑO DE LA INTERFAZ DE CONTROL

En la interfaz de control se tiene un diagrama de bloques que enlaza todos los controles, indicadores y gráficas, de la interfaz gráfica con la placa arduino, y por medio de este, al sensor y a los actuadores.

5.2.3.1 Inicialización

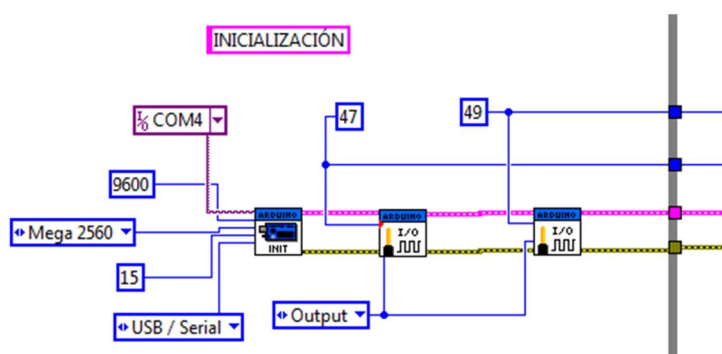


Figura 5.21 Inicialización

Fuente: Propia de los autores

Para empezar debemos configurar Arduino y lo hacemos poniendo el bloque "Init" (figura 5.22) al que le asignamos los parámetros como se observa en la figura 5.21:

- Puerto de comunicación: COM 4
- Velocidad de transmisión: 9600
- Tipo de tarjeta Arduino : Mega 2560
- Número de bits del paquete de comunicación: asume por defecto el sistema
- Tipo de puerto de comunicación: asume por defecto el sistema

Para asignar las constantes mencionadas basta ponerse sobre el terminal con la herramienta y pulsando el botón derecho del ratón podemos

seleccionar el control a añadir con la opción “Create” (Constant, Control, Indicador).

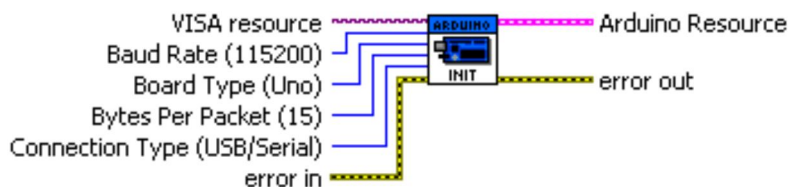


Figura 5.22 Bloque INIT

Fuente: Propia de los autores

Seguidamente configuramos el PIN 47 y el pin 49 como salidas.

Para esto pondremos dos bloques de configuración de E/S (ver figura 5.23) En la entrada “Pin Mode” debemos seleccionar “OUTPUT” y en la entrada “Digital I/O PIN” deberemos crear una constante y colocar los números de pin designados respectivamente.

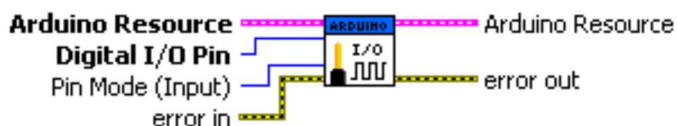


Figura 5.23 Bloque I/O

Fuente: Propia de los autores

Es muy importante que se sepa que los PIN 0 y PIN 1 digitales están ocupados en la comunicación con LabVIEW por lo tanto nunca se deben seleccionar ni para leerlos ni para escribir en ellos.

No debemos olvidarnos de realizar el cableado de los buses de conexión entre módulos como se muestra en la figura 5.24.

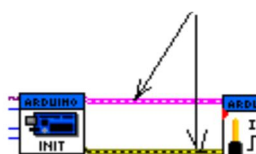


Figura 5.24 Buses de conexión entre módulos

Fuente: Propia de los autores

5.2.3.2 Adquisición de la señal

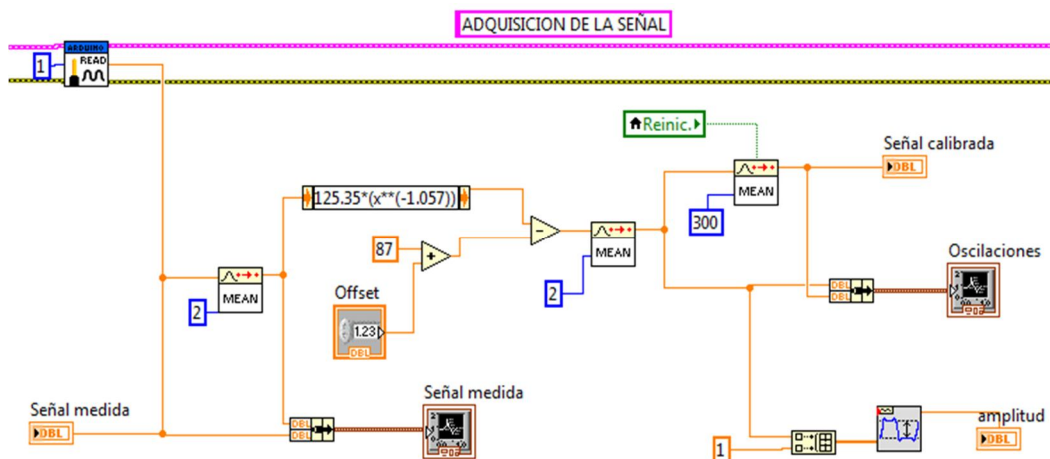


Figura 5.25 Adquisición de la señal

Fuente: Propia de los autores

A continuación se coloca una estructura de tipo “While loop” (figura 5.26), que se ejecutará continuamente hasta que pulsemos el botón “STOP”.

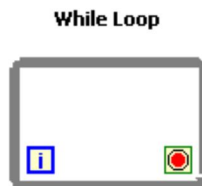


Figura 5.26 Bloque While Loop

Fuente: Propia de los autores

Dentro del bucle “While loop” procederemos a realizar la adquisición de las señales. Para esto utilizamos bloque de lectura de señal analógica “Analog Read Port” tal como se muestra en la figura 5.27.

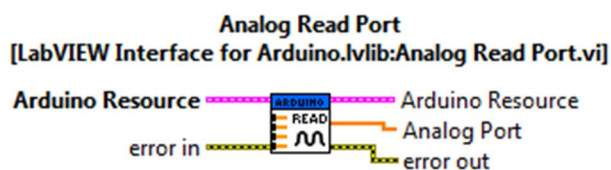


Figura 5.27 Bloque Analog Read Port

Fuente: Propia de los autores

Este bloque nos permite leer los valores del canal analógico A1, en el cual está conectado el sensor. Utilizamos el bloque “mean” (figura 5.28) para realizar un filtro probabilístico, el cual encuentra la media de cada dos valores que se muestreen en el sistema, mejorando la adquisición de datos.



Figura 5.28 Bloque Mean

Fuente: Propia de los autores

El sensor de distancia SHARP GP2D120X envía un valor analógico que equivale a la distancia medida entre la posición fija del sensor y la placa fija en las barras superiores, que nos permite determinar las oscilaciones producidas. La función característica del sensor nos permite escribir la ecuación en el bloque “Expression Node” (figura 5.29) para transformar el valor de entrada analógico en el valor de distancia correspondiente.

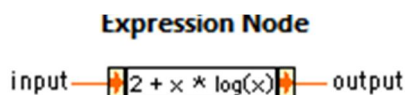


Figura 5.29 Bloque Expression Node

Fuente: Propia de los autores

Para esto se obtiene la ecuación (figura 5.30), de la función característica del sensor Sharp GP2D120x (ver Anexo A-4.1).

Tabla 5.1 Valores de la función característica del sensor Sharp GP2D120x

Distancia reflectiva (mm)	Voltaje analógico (v)
40	2,75
60	2
80	1,55
100	1,25
120	1,05
140	0,95
160	0,8
180	0,75
200	0,65
220	0,6
240	0,55
260	0,5
280	0,45
300	0,425
320	0,4
340	0,385
360	0,375
380	0,35
400	0,325

Fuente: Propia de los autores

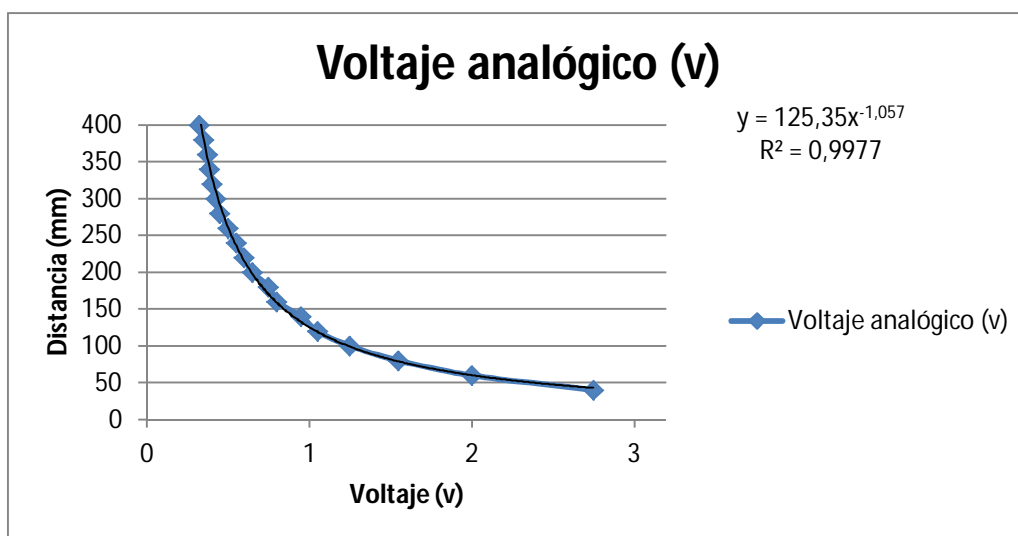


Figura 5.30 Curva distancia vs voltaje del sensor Sharp GP2D120x

Fuente: Propia de los autores

Además es importante realizar la calibración de la señal (figura 5.31), corrigiendo el desfase debido a la distancia a la que se encuentran las barras superiores del sensor, y a las variaciones mínimas producto de posibles interferencias electrónicas; de manera que la señal empiece desde cero; lo cual permitirá procesar y analizar la señal correctamente.

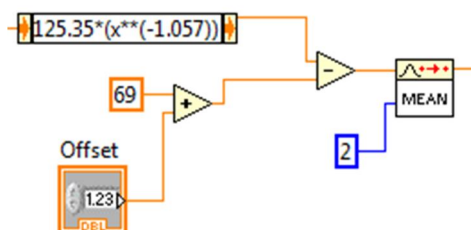


Figura 5.31 Calibración de la señal

Fuente: Propia de los autores

Para poder visualizar las oscilaciones utilizamos un “Waveform Chart”, y a continuación se utiliza el bloque “Amplitude and Levels” (figura 5.32) para determinar la amplitud de las oscilaciones que se producen.

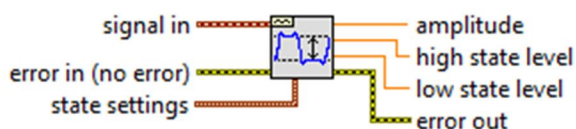


Figura 5.32 Bloque Amplitude and Levels

Fuente: Propia de los autores

5.2.3.3 Análisis de la Señal

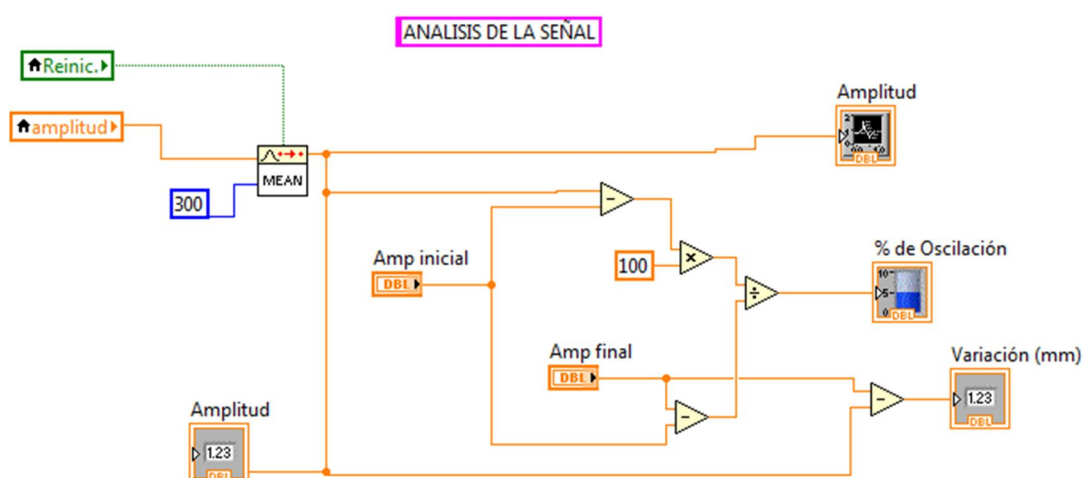


Figura 5.33 Análisis de la señal

Fuente: Propia de los autores

Para el análisis de la señal (figura 5.33), se obtiene el promedio de amplitudes de las oscilaciones, debido a que existe una variación en las oscilaciones producto de un golpeteo inusual que se da entre la leva-seguidor y de algunos errores en la adquisición de la señal. Este promedio no da la amplitud a la que se encuentra oscilando el sistema.

Para obtener el porcentaje de reducción de las oscilaciones, se ingresa la amplitud inicial, que es la amplitud que tiene el sistema antes de encender el motor, y la amplitud final, que indica la amplitud que tiene el sistema una vez que el motor se encuentra en funcionamiento. La reducción de las

oscilaciones se indica en un valor numérico “Variación” en milímetros y en un valor porcentual en un indicador gráfico “Tank”.

5.2.3.4 Control de encendido

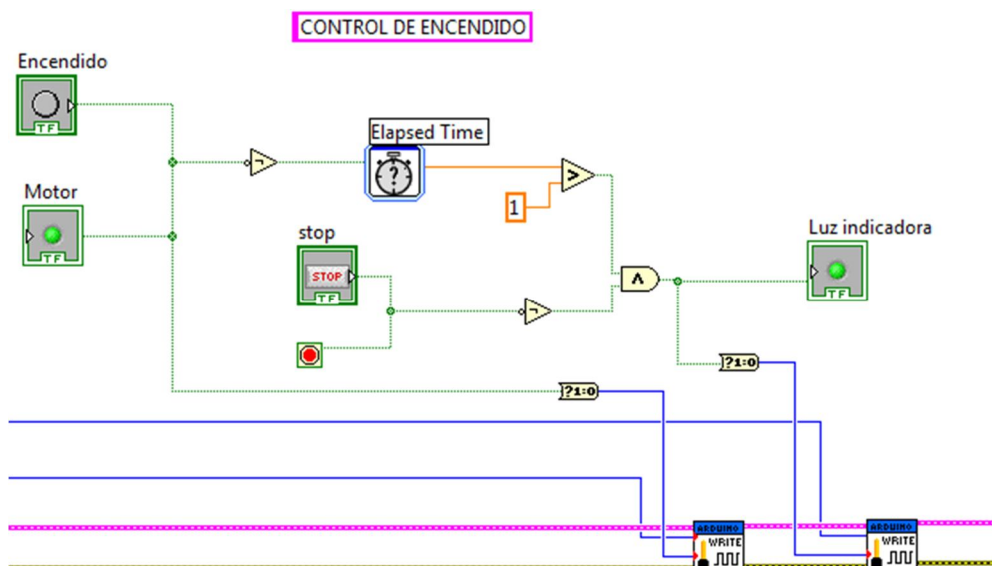


Figura 5.34 Control de encendido

Fuente: Propia de los autores

Para realizar el encendido del sistema (figura 5.34), se utiliza los siguientes bloques correspondientes a las salidas digitales, “Digital Write Pin”, tal como se muestra en la figura 5.35.

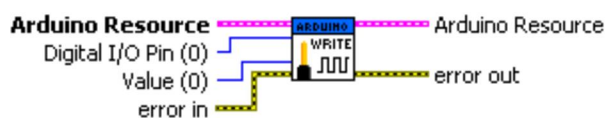


Figura 5.35 Bloque Digital Write Pin

Fuente: Propia de los autores

Los valores que representan el número de PIN para cada bloque, lo reciben de las correspondientes constantes “47” y “49”, que ya estaban

previamente definidas para las salidas digitales que activan a la luz indicadora y al motor.

El valor “Value” que reciben los bloques es de tipo booleano, y viene dado por el botón de “encendido”, para activar la salida digital del motor; y por una función lógica entre el botón de encendido, el botón de Stop y un temporizador que permite la intermitencia de la luz indicadora. Siempre y cuando el botón de encendido está activado y la función lógica de un valor verdadero, se enviará un “1”, a las salidas digitales, activando el sistema.

5.2.3.5 Control de voltaje

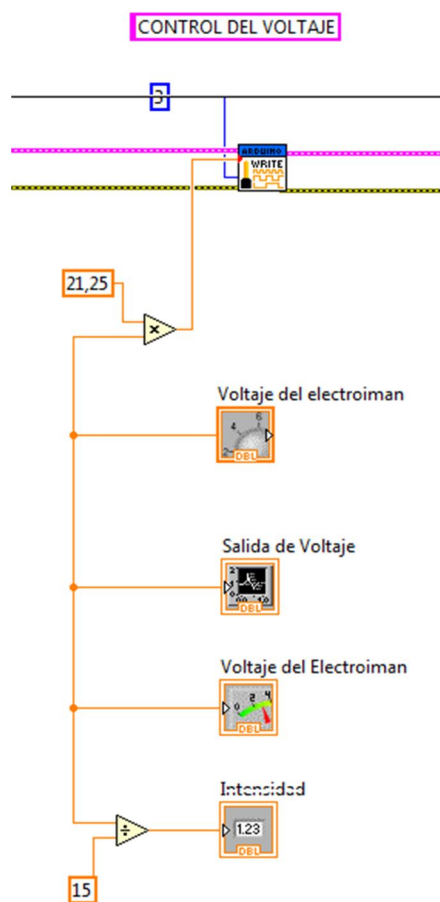


Figura 5.36 Control de voltaje

Fuente: Propia de los autores

El último bloque de función que colocaremos dentro del bucle es el de escritura del valor analógico PWM “PWM Write Pin” (figura 5.37), para realizar el control de voltaje que ingresa al electroimán.

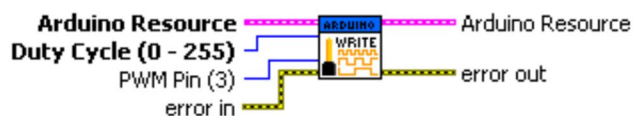


Figura 5.37 Bloque PWM Write Pin

Fuente: Propia de los autores

Para el Pin PWM configuramos el número de PIN “3” y mediante un mando tipo potenciómetro “Voltaje del electroimán” designaremos el valor de la entrada “Duty Cycle (0-255)”. Debido a que el valor que ingresa al bloque debe estar entre 0 a 255, multiplicamos al valor del potenciómetro por la constante 21,25. Además en esta sección podemos calcular el valor de la intensidad, dividiendo el voltaje de entrada para la resistencia que tiene el bobinado del electroimán.

5.2.3.6 Salida

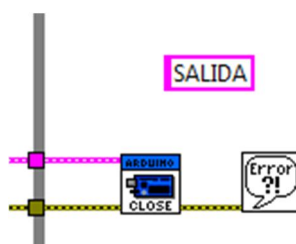


Figura 5.38 Salida

Fuente: Propia de los autores

Finalmente, ya fuera del bucle colocamos el bloque de cierre del canal “Close” (figura 5.38) y el bloque de tratamiento de error, que nos permitirá

mostrar en la pantalla una ventana con información sobre los posibles errores que se produzcan.

5.3 PRUEBAS Y MEDICIONES DEL SISTEMA

Se realizó las pruebas y mediciones del sistema, de manera que se pueda observar: el comportamiento del sistema, el funcionamiento correcto de todos sus componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos; y analizar las señales que muestran las oscilaciones y la amplitud de las mismas frente a la variación del campo magnético, que se consigue al aumentar el voltaje de entrada en el electroimán, determinando así el valor numérico y porcentual de la reducción de la oscilaciones en el sistema.

Para el desarrollo de estas pruebas, se utilizó un fluido con 20% de concentración de partículas metálicas, ya que este representa el comportamiento del FMR a diferentes concentraciones; su coeficiente de amortiguamiento inicial es alto, pero lo suficiente como para permitir que el sistema oscile; su rango de variación de viscosidad es alto y por consiguiente tiene un mayor rango de variación de su coeficiente de amortiguamiento, lo que nos permite que haya una reducción en las oscilaciones del sistema.

Además se colocó al conjunto mecánico en dos posiciones diferentes; la primera en la posición que tiene “por defecto” el conjunto mecánico, que es la que se muestra en los planos en la sección de anexos; y la segunda posición, se colocó el conjunto mecánico recorriendo el eje del motor 5 cm hacia la posición de los soportes de las barras y ubicando paralelamente a las barras superiores e inferiores.

5.3.1 CONSIDERACIONES PRELIMINARES

Se tomará en cuenta las siguientes consideraciones para realizar las pruebas para el funcionamiento del sistema, a fin de obtener e interpretar correctamente los valores de las amplitudes:

- Se determinará los tiempos de reposo máximo del FMR, realizando el ensayo de escalón, esto debido a una particularidad de las partículas metálicas, las cuales no regresan a su estado inicial inmediatamente sino después de un tiempo de reposo, dando así variaciones en el rango inicial de las amplitudes de las oscilaciones, a partir del cual se tomará las mediciones.
- Se determinará el porcentaje y el valor de la reducción de las amplitudes de las oscilaciones, a medida que se varía el voltaje de entrada del electroimán a partir de 0 hasta 12 voltios.
- Se determinará si la respuesta del sistema, es decir, el valor de la reducción de las amplitudes de las oscilaciones, llega a estabilizarse, y el tiempo en el que se realiza esto.

5.3.2 PRUEBAS

5.3.2.1 Primera Posición

Se procede a tomar las mediciones del sistema en la primera posición, en la cual primeramente se determinará el tiempo de reposo máximo del FMR, a partir del cual el rango de la amplitud será el mismo. Para esto se observa el comportamiento del amortiguador magnetoreológico a partir de distintos tiempos de reposo.

Tabla 5.2 Mediciones del tiempo de reposo y la amplitud para la primera posición

Tiempo de reposo (s)	Amplitud (mm)
0	8,25
1	8,35
2	8,35
3	8,25
4	8,25
5	8,2
6	8,25
8	8,2
10	8,25
12	8,25
15	8,25

Fuente: Propia de los autores

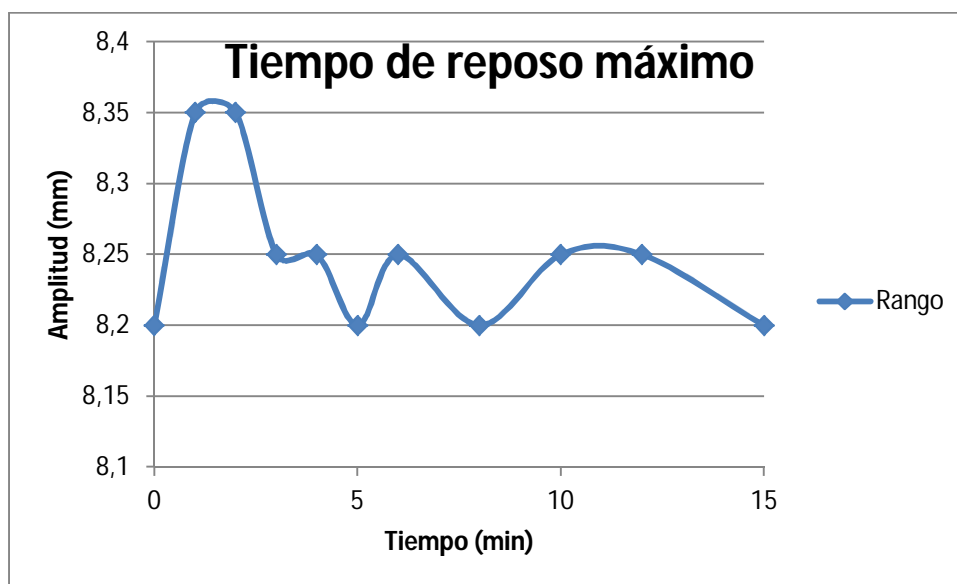


Figura 5.39 Tiempo de reposo máximo primera posición

Fuente: Propia de los autores

Se observa en la figura 5.39, que existe variación en el rango de amplitud inicial, de aproximadamente 0,15 mm en un tiempo de reposo de hasta 3 minutos, lo cual indicaría un desfase al momento de realizar las mediciones. A partir de un tiempo de reposo de 4 minutos se tiene una variación de 0,05 mm, lo cual es un valor aceptable para realizar las mediciones.

Estas variaciones en el rango de amplitud inicial se presentan, debido a que las partículas metálicas se desplazan dentro del fluido y algunas se encuentran cargadas magnéticamente, provocando que al momento de realizar una siguiente prueba no se obtengan los mismos resultados.

Se recomienda por tanto un tiempo de reposo del FMR de 5 minutos antes de realizar una siguiente prueba, de esta manera nos aseguramos de obtener un rango de variación de la amplitud inicial, en este caso de 8,2 mm, a partir del cual se realizarán las mediciones correspondientes.

A continuación se procede a obtener las variaciones que se producen en la amplitud de las vibraciones a los diferentes voltajes y determinar su porcentaje de reducción; se realizan estas pruebas tomando una muestra de 26 datos cada 5 segundos, con una variación de voltaje de 0, 8, 9 10, 11 y 12 voltios como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5.3 Amplitud de las vibraciones a diferentes voltajes para la primera posición

Tiempo (s)	Delta x (mm)					
	0V	8V	9V	10V	11V	12V
0	0	0	0	0	0	0
5	0,01	0,2	0,22	0,25	0,38	0,59
10	0,05	0,45	0,35	0,39	0,63	0,84
15	-0,03	0,41	0,67	0,58	0,81	1
20	0	0,5	0,79	0,72	1	1,4
25	-0,03	0,47	0,8	0,89	1,1	1,6
30	0,03	0,44	0,91	1	1,2	1,7
35	-0,01	0,47	0,89	1,1	1,4	1,6
40	0,02	0,41	0,83	1,2	1,4	1,7
45	-0,04	0,39	0,76	1,25	1,4	1,6
50	0,03	0,45	0,69	1,15	1,3	1,6
55	0,05	0,53	0,66	1,05	1,4	1,6
60	0	0,55	0,65	1,2	1,4	1,6
65	0,039	0,48	0,79	1,15	1,4	1,6
70	0,042	0,4	0,78	1,15	1,4	1,6
75	0,041	0,43	0,78	1,15	1,4	1,6
80	0,03	0,38	0,74	1,2	1,4	1,7
85	-0,018	0,45	0,78	1,22	1,4	1,6
90	-0,04	0,4	0,8	1,15	1,4	1,7
95	-0,04	0,48	0,8	1,15	1,4	1,6
100	0,03	0,43	0,76	1,2	1,4	1,7
105	0,03	0,47	0,74	1,15	1,45	1,7
110	-0,027	0,46	0,72	1,15	1,45	1,7
115	-0,05	0,47	0,73	1,15	1,45	1,6
120	-0,01	0,39	0,76	1,15	1,45	1,6
125	0	0,37	0,77	1,15	1,45	1,7

Fuente: Propia de los autores

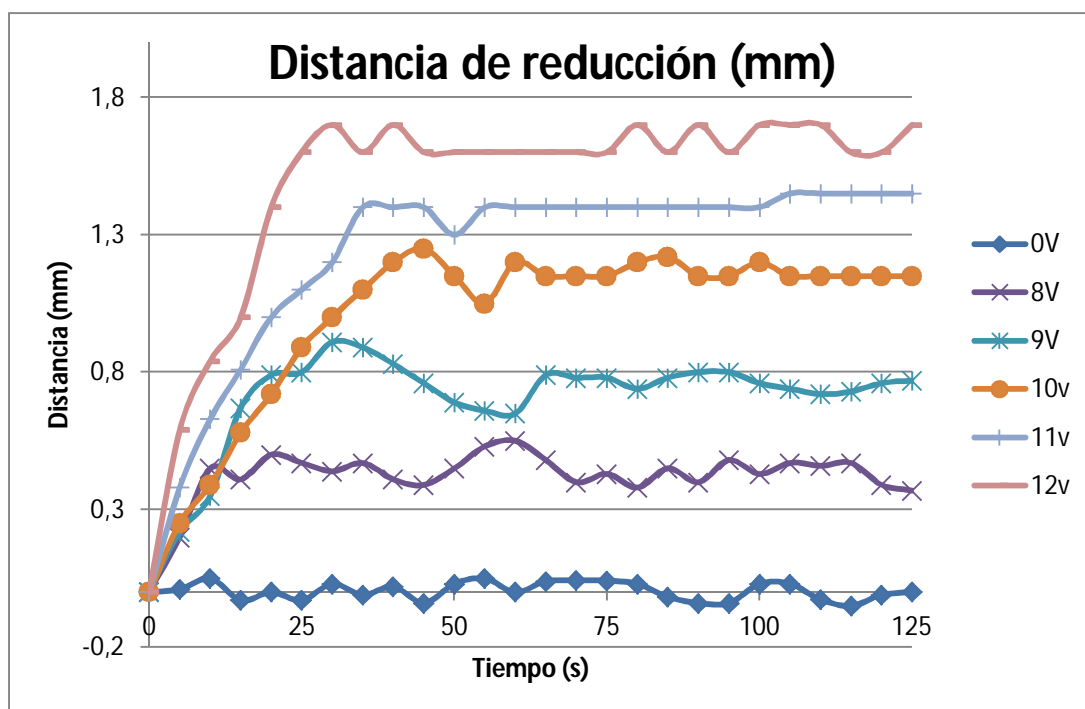


Figura 5.40 Distancia de reducción a diferentes voltajes para la primera posición

Fuente: Propia de los autores

Como se observa en la figura 5.40 se utiliza valores de voltaje superiores a 8v, debido a que a partir de este valor de voltaje existe una variación considerable de las amplitudes y por consiguiente una reducción en el porcentaje de oscilaciones.

Se puede observar que existe un tiempo en el cual los valores llegan a estabilizarse, a partir de los 60 segundos en los valores correspondientes a 8, 9 y 10 voltios y un tiempo de 35 segundos para los valores correspondientes a 11 y 12 voltios. A pesar de que se tiene pequeñas variaciones, estas son menores a 0,05 mm, lo cual se considera como valores despreciables.

En la figura 5.41 se muestra el porcentaje promedio de la reducción de las amplitudes de las oscilaciones.

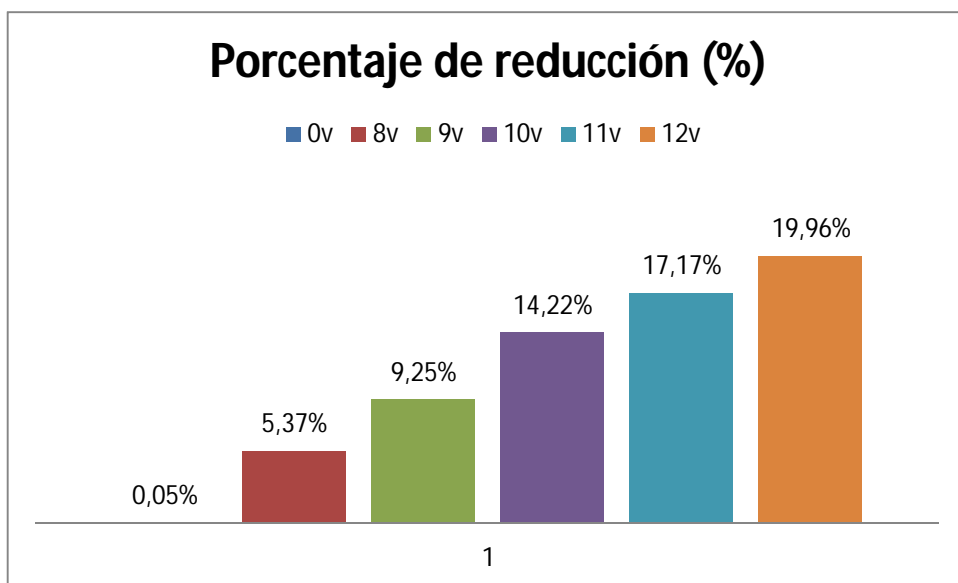


Figura 5.41 Porcentaje de reducción primera posición

Fuente: Propia de los autores

Se puede observar que el sistema permite un valor máximo de reducción de las amplitudes de oscilación, de aproximadamente un 20%, correspondientes a un valor de 1,7mm, con un voltaje inducido al electroimán de 12 v; y un valor mínimo de 5,4%, correspondiente a una variación de 0,4 mm, con un voltaje inducido al electroimán de 8v.

5.3.2.2 Segunda Posición

Se procede a tomar las mediciones del sistema en la segunda posición; de la misma manera primeramente se determinará el tiempo de reposo máximo del FMR, a partir del cual el rango de la amplitud será el mismo. Para esto se observa el comportamiento del amortiguador magnetoreológico a partir de distintos tiempos de reposo.

Tabla 5.4 Mediciones del tiempo de reposo y la amplitud para la segunda posición

Tiempo de reposo (s)	Amplitud (mm)
0	5,2
1	5,2
2	5,4
3	5,4
4	5,2
5	5,25
6	5,15
8	5,2
10	5,2
12	5,2
15	5,1

Fuente: Propia de los autores

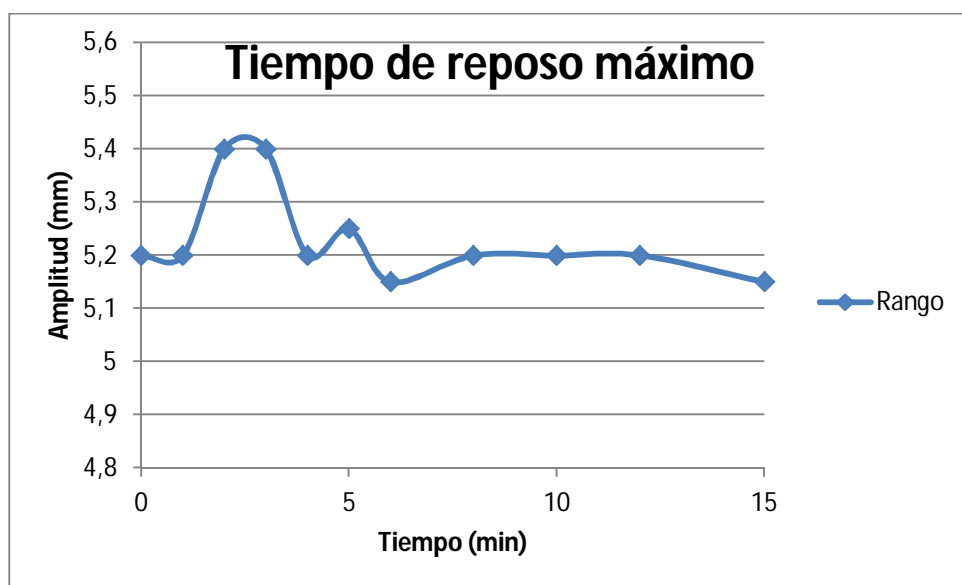


Figura 5.42 Tiempo de reposo máximo segunda posición

Fuente: Propia de los autores

Se observa en la figura 5.42, que existe variación en el rango de amplitud inicial, de aproximadamente 0,2 mm en un tiempo de reposo de hasta 3 minutos, lo cual indicaría un desfase al momento de realizar las mediciones. A partir de un tiempo de reposo de 4 minutos se tiene una variación de 0,05 mm, lo cual es un valor aceptable para realizar las mediciones.

Se recomienda por tanto un tiempo de reposo del FMR de 5 minutos antes de realizar una siguiente prueba, de esta manera nos aseguramos de obtener un rango de variación de la amplitud inicial en esta caso de 5,2 mm, a partir del cual se realizara las mediciones correspondientes.

A continuación se procede a obtener las variaciones que se producen en la amplitud de las vibraciones a los diferentes voltajes y determinar su porcentaje de reducción; se realizan estas pruebas tomando una muestra de 26 datos cada 5 segundos, con una variación de voltaje de 0, 8, 9 10, 11 y 12 voltios como se muestra en la siguiente tabla 5.5:

Tabla 5.5 Amplitud de las vibraciones a diferentes voltajes para la segunda posición

Tiempo (s)	Delta x (mm)					
	0V	8V	9V	10V	11V	12V
0	0	0	0	0	0	0
5	0,02	0	0,05	0,075	0,1	0,13
10	0,01	0	0,07	0,14	0,19	0,22
15	0	0	0,09	0,18	0,3	0,45
20	-0,02	0	0,1	0,27	0,44	0,61
25	-0,02	0	0,12	0,36	0,53	0,71
30	-0,01	0	0,13	0,4	0,57	0,81
35	0	-0,01	0,12	0,37	0,6	0,8
40	0,02	-0,01	0,1	0,39	0,58	0,75
45	0,02	0	0,09	0,4	0,56	0,75
50	0,02	0	0,1	0,37	0,57	0,75
55	0	0,03	0,11	0,35	0,57	0,75
60	-0,02	0,04	0,1	0,35	0,57	0,75
65	-0,02	0,04	0,09	0,37	0,58	0,78
70	-0,02	0,04	0,09	0,39	0,58	0,8
75	0	0,04	0,09	0,4	0,59	0,8
80	0	0,04	0,1	0,41	0,6	0,78
85	0	0,04	0,1	0,4	0,6	0,79
90	0,02	0,03	0,11	0,39	0,61	0,8
95	0,02	0,02	0,12	0,38	0,61	0,8
100	0,01	0,03	0,11	0,37	0,59	0,79
105	0	0	0,1	0,38	0,6	0,8
110	-0,01	0	0,1	0,39	0,6	0,8
115	-0,01	0,03	0,1	0,39	0,58	0,8
120	0	0,03	0,1	0,4	0,6	0,8
125	0	0,03	0,11	0,39	0,59	0,78

Fuente: Propia de los autores

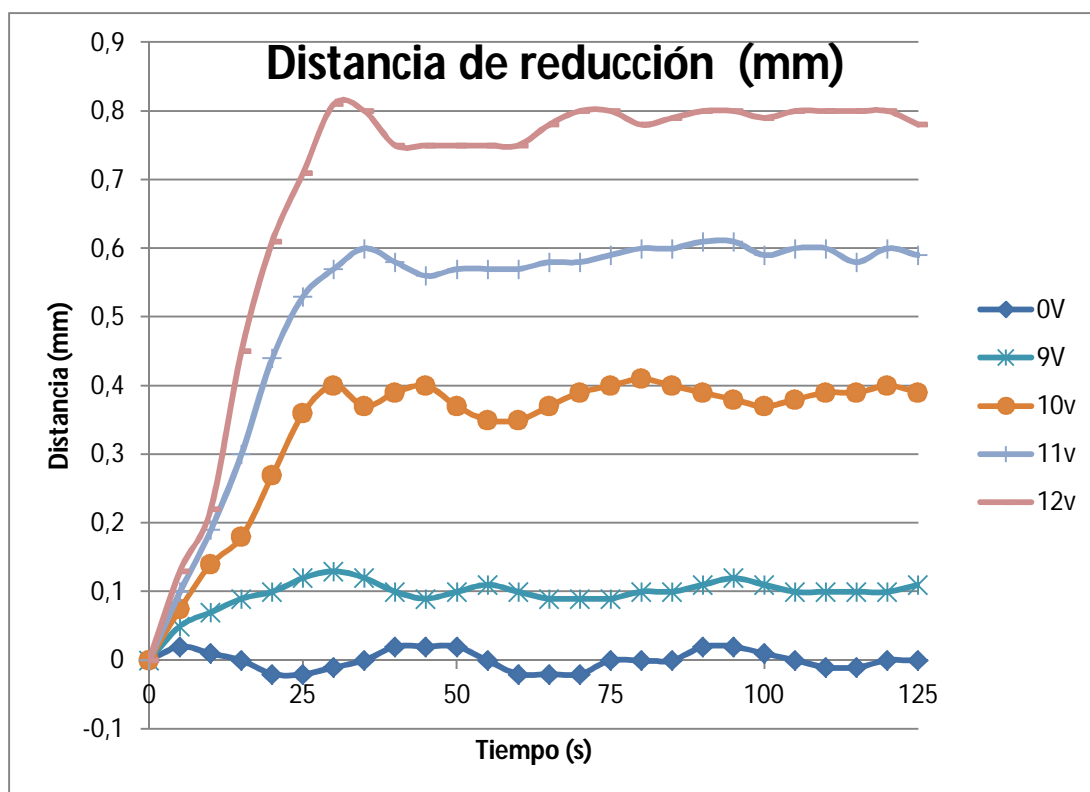


Figura 5.43 Distancia de reducción a diferentes voltajes para la segunda posición

Fuente: Propia de los autores

En este caso utiliza valores de voltaje superiores a 9v, debido a que a partir de este valor de voltaje existe una variación considerable de las amplitudes y por consiguiente una reducción en el porcentaje de oscilaciones, así como se aprecia en la figura 5.43.

Se puede observar que existe un tiempo en el cual los valores llegan a estabilizarse, a partir de los 60 segundos en los valores correspondientes a, 9 y 10 voltios y un tiempo de 35 segundos para los valores correspondientes a 11 y 12 voltios. A pesar de que se tiene pequeñas variaciones, estas son menores a 0,05 mm, lo cual se considera como valores despreciables.

En la siguiente figura 5.44 se muestra el porcentaje promedio de la reducción de las amplitudes de las oscilaciones.

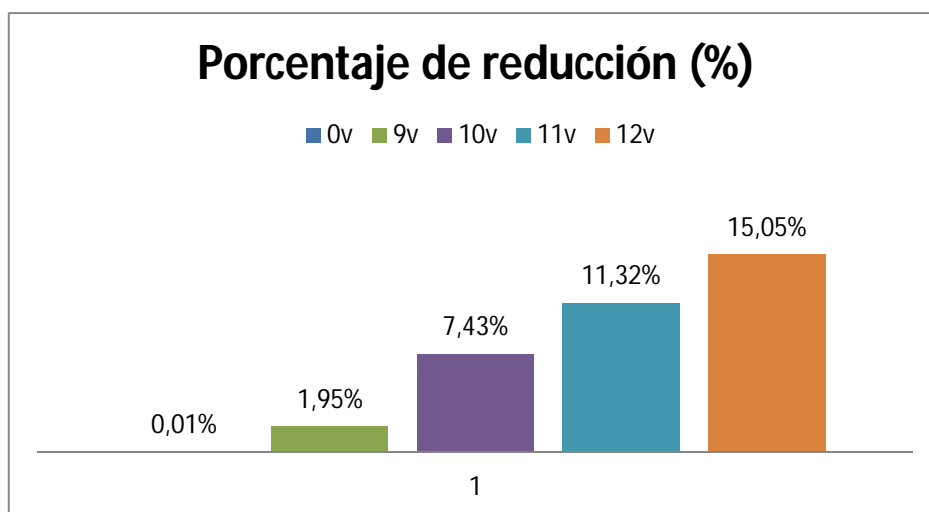


Figura 5.44 Porcentaje de reducción segunda posición

Fuente: Propia de los autores

Se puede observar que el sistema permite un valor máximo de reducción de las amplitudes de oscilación, de aproximadamente un 15%, correspondientes a un valor de 0,75 mm, con un voltaje inducido al electroimán de 12 v; y un valor mínimo de 7,4%, correspondiente a una variación de 0,1 mm con un voltaje inducido al electroimán de 9v.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Las partículas de acero, obtenidas a partir del proceso de rectificación de discos de acero, son ideales para la elaboración del fluido magnetoreológico debido a que muestran una gran inducción magnética al aplicarse un campo magnético.
- El uso de un aceite de baja viscosidad, aproximadamente de 315 cP de viscosidad dinámica, para realizar el fluido magnetoreológico, provoca en el amortiguador un coeficiente de amortiguamiento bajo, que es adecuado para nuestro sistema mecánico que está sometido a cargas pequeñas.
- Es importante analizar al FMR, considerándolo como un fluido con una composición y concentración determinada, que posee características y un comportamiento particular, el cual puede tener una variación en cuanto a su viscosidad; ya que si se analiza desde el punto de vista del aceite, este no podría tener un cambio en su viscosidad, sino en su comportamiento dinámico.

- A medida que aumenta el porcentaje de concentración de partículas de acero, aumenta su viscosidad inicial y existe un mayor rango en su variación.
- En los ensayos de medición de viscosidad, se puede observar que existe una variación creciente y no lineal en la viscosidad, a medida que se aplica un campo magnético creciente.
- Se pudo determinar en los ensayos del coeficiente de amortiguamiento, que existe un aumento considerable de este coeficiente a medida que se aumenta la concentración de partículas de acero del FMR, a pesar de que no existe una aplicación de campo magnético.
- Se determinó que a medida que se aplica un campo magnético creciente, el coeficiente de amortiguamiento va aumentando.
- Se determinó que este fluido magnetoreológico necesita de un tiempo de reposo para la reestructuración de las partículas dentro del fluido, por lo que podría compararse con el comportamiento de un fluido tixotrópico, según la clasificación reológica de los fluidos no newtonianos.
- Se determinó que este fluido magnetoreológico, aumenta su viscosidad a medida que se incrementa el campo magnético, por lo

que se podría comparar con el comportamiento de un fluido reo-
espesante (shear-thickening), según la clasificación reológica de los
fluidos no newtonianos.

- Se determinó, una vez realizado el ensayo de escalón, que es necesario un tiempo de reposo mayor a 4 min entre cada prueba realizada, para que se recupere la estructura del FMR, debido a que algunas partículas quedan cargadas magnéticamente y no regresan a su condición inicial, provocando una variación en el rango de amplitud inicial y consecuentemente un desfase en las mediciones.
- Se determinó en las pruebas realizadas en la primera y segunda posición, que el sistema permite un valor máximo de reducción de las amplitudes de oscilación, de aproximadamente un 20% y 15% respectivamente, inducido al electroimán de 12 v; y un valor mínimo de 5,4% y 2% correspondiente a cada posición, con un voltaje inducido al electroimán de 8v.

6.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda obtener partículas de acero, de un proceso de rectificación que no utilice agentes oxidantes, de preferencia se realice este proceso en seco. Obtener la mayor cantidad posible para el desarrollo de las pruebas, pues a través de los proceso de filtrado y granulometría se obtiene aproximadamente un 10% de la muestra total.
- Es recomendable obtener partículas de acero, con un tamaño de hasta 200 μm , obtenidas a través de un proceso de granulometría, excluyendo en este proceso el uso de agua o agentes oxidantes.
- Para realizar los ensayos de viscosidad dinámica se recomienda utilizar un viscosímetro de Brookfield, ya que permite realizar las mediciones de viscosidad de un FMR, aplicándose un campo magnético, sin que este influya en los valores medidos.
- Se recomienda utilizar fluidos magnetoreológicos con concentraciones de porcentajes en peso del 10, 20, 30 y 40% con respecto al fluido, para realizar los ensayos de viscosidad dinámica, de esta manera se asegura una concentración exacta, ya que al tener distintos tamaños de grano, no se lo puede realizar con un porcentaje al volumen

- Es importante sellar al amortiguador colocando un empaque de caucho en la ranura de la tapa y teflón alrededor de la rosca de la tapa del cilindro, para evitar que existan filtraciones de FMR.
- No se recomienda alimentar el electroimán, con valores de voltaje superiores a 12 v y de corriente superiores a 1 A, ya que el electroimán podría llegar a calentarse, elevando la temperatura del FMR e influyendo directamente en las mediciones de su viscosidad.
- Para que el sistema se encuentre en vibración se recomienda que el valor del coeficiente de amortiguamiento sea menor a 314 N*s/m , de esta manera se tendrá un mayor rango de reducción de las oscilaciones del sistema.
- No se recomienda aumentar la velocidad de motor, a más de 60 RPM, para evitar que se produzcan golpeteos y saltos del seguidor, que pueden producir un desgaste rápido de los elementos mecánicos y generar problemas al momento de realizar el análisis de las oscilaciones del sistema.
- Se recomienda, utilizar un filtro RC y un filtro probabilístico para disminuir la interferencia de ruido en la señal y mejorar la adquisición de datos, que provienen del sensor SHARP GP2D120x.

- Debido factores externos o por algún cambio en la posición inicial, es necesario realizar la calibración del sensor SHARP GP2D120x, utilizando el offset para “encerar” el valor de la señal al momento de comenzar a realizar las pruebas.
- Se recomienda un tiempo de reposo del FMR de 5 minutos antes de realizar una siguiente prueba, de esta manera nos aseguramos de obtener el mismo rango de variación de la amplitud inicial.
- Se recomienda tomar mediciones con valores de voltaje inducido al electroimán a partir de 8v, valor en el cual se puede apreciar una reducción de la amplitud de las oscilaciones, esto en la primera posición y a partir de 9v la segunda posición. Considerar una tolerancia de $\pm 0,05$ mm.

BIBLIOGRAFIA

- Materiales inteligentes. (2012). *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, Vol. 16*(No. 1), 27-36.
- ABB Group. (2010). *Nuevos sensores de corriente y de tensión de media tensión*. Obtenido de [http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/8d9d3dfebccb2ba4c2256c780052e37f/\\$file/ABB-Sensores%20de%20Corriente%20y%20Tensi%C3%B3n.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/8d9d3dfebccb2ba4c2256c780052e37f/$file/ABB-Sensores%20de%20Corriente%20y%20Tensi%C3%B3n.pdf)
- ACTIMAT. (2010). Materiales inteligentes. *Adimendun MATERIALAK*, 1-2.
- ARDUINO. (2013). *ARDUINO MEGA 2650*. Obtenido de <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>
- Beer, F., & Johnston, R. (2007). *Mecánica Vectorial para ingenieros* (Quinta ed.). México: McGraw-Hill.
- Carlson, J. a. (1996). Magneto-Rheological Fluid Dampers for Semi-Active Seismic Control. *3rd Int. Conf. on Motion and Vibration Control*, (págs. 35-40). China, Japan.
- Elizondo, M. C. (1998). Amortiguadores Magnetoreológicos. *V Congreso Mexicano de Acústica*, (pág. 50). Querétaro, México.
- Filtra Vibración S.L. (2012). *Tamices de laboratorio*. Obtenido de http://www.filtra.com/Productos_Tamices.html
- Fundacion Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT). (2011). *Informe de prospectiva de nuevos materiales inteligentes*. España: Global Diseña.
- Fundición Red de Energia - BUN-CA. (2010). *Motores Electricos*. San José, Costa Rica.
- Hermida Bun, J. R. (2000). *Fundamentos de Ingeniería de Procesos Agroalimentarios*. Barcelona, España: Aedos S.A.

- Investigación y Extensión del Campus Monterrey. (2006). En el Postgrado. *Revista digital de Postgrado*(76).
- Iyer, S. (2012). *Sidharth Iyer Modeling and Testing of a Series Elastic Actuator with Controllable Damping*. Massachusetts, United States.
- JCCM. (2010). *Magnetismo y Electromagnetismo*. Obtenido de Electroimán: <http://edu.jccm.es/ies/losolmos/TECNOLOGIA/udtecnologia/UD/Electroimanes.pdf>
- Llorente, D. (2010). *El sensor de distancia GP2D120*. Obtenido de http://www.iesluisdelucena.es/dpp/docs/presentaciones/El_sensor_GP2D120_rev291110.pdf
- Lord Corporation. (2013). Obtenido de Properties and applications of commercial magnetorheological fluids.: <http://www.lord.com/products-and-solutions/magneto-rheological-%28mr%29.xml>
- Lucas, D. M. (15 de Julio de 2010). *Viscosímetros: Brookfield y Caída de bolas*. Obtenido de Textura y Reología: <http://avibert.blogspot.com/2010/07/viscosimetros-brookfield-y-de-caida-de.html>
- Marder, F., Franco, A., & Lombardero, O. G. (2003). *Sensor lineal de corriente para medición de energía*. Obtenido de Universidad Nacional del Nordeste: <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2003/comunicaciones/07-Tecnologicas/T-045.pdf>
- Norton, R. L. (2005). *Diseño de Máquinas* (Tercera ed.). McGraw-Hill.
- Ramirez, J. S. (2006). *Fundamentos de Reología de Alimentos*. Cali, Colombia. Obtenido de www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r53208.DOC
- Rivera, E. (2001). *Introducción a la mecánica de fluidos*. Obtenido de Facultad Nacional de ingeniería: <http://erivera-2001.com/files/Introduccion.pdf>

- Salamanca, D. M. (2010). *Vibraciones Mecánicas*. Apuntes, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Chile.
- Sánchez, C. B. (2012). *Estudio de Tendencias Tecnológicas en el Sector de Maquinaria de Obras Públicas, Construcción y Minería*. Aragon, Italia.
- Scribd. (2012). *Valores normalizados Cables A.W.G.* Obtenido de <http://es.scribd.com/doc/61665607/Tabla-AWG>
- Steffe, J. F. (1996). *RHEOLOGICAL METHODS IN FOOD PROCESS ENGINEERING*. Michigan State University, Agricultural Engineering, Michigan, USA.
- T.A.V. Multimedia. (2009). *Teoría de sistema vibratorios*. Obtenido de Artículos E-books: <http://www.tav.net/transductores/teoria-sistemas-vibratorios.pdf>
- TEXACO. (2012). *HAVOLINE PREMIUM SAE 20W50*. Obtenido de http://www.lubricantespremium.com/texaco/PDS%20HAVOLINE_PREMIUM_SAE_20W50.pdf
- YANG, G. (2001). *Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modelling, Testing and Control*. Notre Dame, Indiana.