



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Caracterización de banco de prueba para prótesis de rodilla durante la marcha humana

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Silverio De la Cruz Solís

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Álvaro Ayala Ruiz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres

Contenido

| | |
|--|----|
| Contenido de figuras..... | 5 |
| Contenido de tablas..... | 7 |
| Introducción..... | 8 |
| Capítulo 1 Antecedentes..... | 9 |
| 1.1) Funciones de la rodilla | 9 |
| 1.2) Amplitud de movimiento..... | 10 |
| 1.3) Marcha humana..... | 12 |
| 1.4) Microcontroladores | 14 |
| 1.5) Amortiguadores | 17 |
| 1.6) Prótesis | 21 |
| 1.6.1) Tipos de prótesis de rodilla..... | 21 |
| 1.6.2) Clasificación de prótesis de rodilla por control | 23 |
| 1.6.3) Clasificación de prótesis por gasto de energía | 25 |
| Capítulo 2 Metodología | 27 |
| Definición del problema de movilidad..... | 27 |
| Hipótesis | 27 |
| Metas | 27 |
| Metodología..... | 27 |
| Planeación del proyecto | 30 |
| Capítulo 3 Desarrollo | 32 |
| Introducción..... | 32 |
| 3.1) ¿Por qué el uso de un dispositivo semiactivo para una prótesis de rodilla?..... | 32 |
| 3.2) Condiciones de uso de la prótesis | 37 |
| 3.3) Trabajos sobre el amortiguador magneteoreológico | 38 |
| Resumen | 45 |
| Diseño Conceptual..... | 45 |
| Banco de pruebas preliminar..... | 46 |
| Prueba preliminar | 47 |
| Banco de pruebas | 54 |

| | |
|--|-----|
| Prueba 1..... | 55 |
| Prueba 2..... | 58 |
| Diseño de modelo del amortiguador..... | 60 |
| Prueba 3..... | 64 |
| Capítulo 4 Resultados | 67 |
| Introducción..... | 67 |
| 4.1) Resultados de prueba 1: | 67 |
| 4.2) Resultados de prueba 2: | 73 |
| 4.3) Resultados de prueba 3: | 77 |
| Discusión..... | 81 |
| Conclusión..... | 83 |
| Trabajos futuros..... | 84 |
| Anexos de resultados..... | 85 |
| Anexo resultados de prueba 1:..... | 85 |
| Anexo resultados de prueba 2:..... | 95 |
| Modelo del amortiguador..... | 101 |
| Anexo resultados de prueba 3:..... | 107 |
| Bibliografía..... | 117 |

Contenido de figuras

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1.1 Radiografía de la rodilla desde plano sagital (Nordin, 2012)</i> | 9 |
| <i>Figura 1.2 Movimiento flexión-extensión (Gorrotxategi, 1996)</i> | 9 |
| <i>Figura 1.3 Rotaciones articulaciones biaxiales (Gowitzke, 2006)</i> | 10 |
| <i>Figura 1.4 Planos anatómicos (System, 2017)</i> | 10 |
| <i>Figura 1.5 Ángulo de flexión rodilla en marcha humana (Nordin, 2012)</i> | 11 |
| <i>Figura 1.6 Intervalo del movimiento de la articulación tibiofemoral en el plano sagital durante las actividades frecuentes (Nordin, 2012)</i> | 11 |
| <i>Figura 1.7 Ciclo de la marcha humana (Nordin, 2012)</i> | 12 |
| <i>Figura 1.8 Cinemática 1ª fase de la marcha humana (Stengele, 2008)</i> | 13 |
| <i>Figura 1.9 Cinemática 2ª fase de la marcha humana (Stengele, 2008)</i> | 13 |
| <i>Figura 1.10 Segundo apoyo unilateral (A. Martín Nogueras, 1999)</i> | 14 |
| <i>Figura 1.11 Ejemplo de microcontrolador (PIC 16F84A.) (Dispositivos lógicos programables, 2013)</i> | 14 |
| <i>Figura 1.12 Reparto del uso de microcontroladores en las áreas de mayor difusión en el 2013 (Dispositivos lógicos programables, 2013)</i> | 15 |
| <i>Figura 1.13 Arquitectura Von Neumann (Ibrahim, 2002)</i> | 16 |
| <i>Figura 1.14 Arquitectura Harvard (Ibrahim, 2002)</i> | 16 |
| <i>Figura 1.15 Amortiguador hidráulico (Autingo, 2016)</i> | 18 |
| <i>Figura 1.16 Amortiguador de gas (Normando, 2016)</i> | 19 |
| <i>Figura 1.17 Amortiguador magnetoreológico</i> | 19 |
| <i>Figura 1.18 Respuesta de fluido magnético a campo magnético (Actimat, 2009)</i> | 20 |
| <i>Figura 1.19 Respuesta de viscosidad en función de la velocidad de corte a 25 °C. (Garza, 2017)</i> | 20 |
| <i>Figura 1.20 Curva de inducción magnética (Garza, 2017)</i> | 20 |
| <i>Figura 1.21 Rodilla monocéntrica (Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, 2003)</i> | 22 |
| <i>Figura 1.22 Tipos de Rodilla policéntrica (Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, 2003)</i> | 22 |
| <i>Figura 1.23 Rodilla para desarticulación (Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, 2003)</i> | 23 |
| <i>Figura 1.24 Rodilla con control neumático (Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, 2003)</i> | 24 |
| <i>Figura 1.25 Rodilla con control hidráulico (Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, 2003)</i> | 24 |
| <i>Figura 1.26 Comparación de ángulos de flexión de la rodilla (Laurentino, 2011)</i> | 25 |
| <i>Figura 2.1 Proceso de planeación</i> | 28 |
| <i>Figura 2.2 Metodología</i> | 31 |
| <i>Figura 3.1 Posibles diseños de prótesis (Nájera, 2007)</i> | 33 |
| <i>Figura 3.2 Posibles diseños de prótesis (Nájera, 2007)</i> | 33 |
| <i>Figura 3.3 Primer Mecanismo Previo (Nájera, 2007)</i> | 34 |
| <i>Figura 3.4 Segundo Mecanismo Previo (Nájera, 2007)</i> | 34 |
| <i>Figura 3.5 Diseño Mecánico Previo Final (Nájera, 2007)</i> | 35 |
| <i>Figura 3.6 Mecanismo con actuador (Nájera, 2007)</i> | 35 |
| <i>Figura 3.7 Modelo mecánico final (Nájera, 2007)</i> | 36 |
| <i>Figura 3.8 Mecanismos de barras (Nájera, 2007)</i> | 36 |
| <i>Figura 3.9 Isométrico de prototipo final (Nájera, 2007)</i> | 36 |
| <i>Figura 3.10 Prótesis de rodilla (Nájera, 2007)</i> | 37 |
| <i>Figura 3.11 Amortiguador Sísmico MR (Jiménez, 2002)</i> | 38 |
| <i>Figura 3.12 Modelo mecánico del amortiguador MR de Bouc-Wen (Jiménez, 2002)</i> | 38 |
| <i>Figura 3.13 Diagrama de Implementación de experimento amortiguador MR (Jiménez, 2002)</i> | 40 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 3.14 Respuesta del amortiguador MR (Jiménez, 2002)</i> | 41 |
| <i>Figura 3.15 Fuerza vs Tiempo (Jiménez, 2002)</i> | 41 |
| <i>Figura 3.16 Respuesta del modelo propuesto del amortiguador (Jiménez, 2002)</i> | 44 |
| <i>Figura 3.17 Banco de pruebas preliminar</i> | 46 |
| <i>Figura 3.18 Ejemplo de prueba preliminar</i> | 48 |
| <i>Figura 3.19 Comportamiento de voltaje-Cjto. Exp. 1</i> | 50 |
| <i>Figura 3.20 Comportamiento de masa-Cjto. Exp. 1</i> | 50 |
| <i>Figura 3.21 Comportamiento de voltaje-Cjto. Exp. 2</i> | 51 |
| <i>Figura 3.22 Comportamiento de masa-Cjto. Exp. 2</i> | 51 |
| <i>Figura 3.23 Comportamiento de voltaje-Cjto. Exp. 3</i> | 52 |
| <i>Figura 3.24 Comportamiento de masa-Cjto. Exp. 3</i> | 52 |
| <i>Figura 3.25 Banco de pruebas</i> | 54 |
| <i>Figura 3.26.- Ejemplo de captura de amortiguador con cámara térmica</i> | 57 |
| <i>Figura 3.27 Cámara Térmica Flir i3</i> | 57 |
| <i>Figura 3.28 Ejemplo de prueba 2</i> | 60 |
| <i>Figura 3.29 Datos de tabla para obtención de modelo para amortiguador</i> | 61 |
| <i>Figura 4.1 Búsqueda de Comportamiento Lineal</i> | 69 |
| <i>Figura 4.2 Correlación Prueba 1</i> | 72 |
| <i>Figura 4.3 Relación Masa vs Tiempo-Tabla 18</i> | 74 |
| <i>Figura 4.4 Correlación Prueba 2</i> | 76 |
| <i>Figura 4.5 Comparación de tiempos_1</i> | 78 |
| <i>Figura 4.6 Efectividad de ecuaciones</i> | 80 |
| <i>Figura 5.1 Comportamiento del amortiguador-Tabla 5.1</i> | 87 |
| <i>Figura 5.2 Comportamiento del amortiguador-Tabla 5.2</i> | 89 |
| <i>Figura 5.3 Comportamiento del amortiguador-Tabla 5.3</i> | 92 |
| <i>Figura 5.4 Comportamiento del amortiguador-Tabla 5.4</i> | 94 |
| <i>Figura 5.5 Relación Voltaje vs Temperatura-Tabla 5.4</i> | 95 |
| <i>Figura 5.6 Relación Masa vs Tiempo-Tabla 5.5</i> | 97 |
| <i>Figura 5.7 Relación Masa vs Tiempo-Tabla 5.6</i> | 98 |
| <i>Figura 5.8 Relación Masa vs Tiempo-Tabla 5.7</i> | 100 |
| <i>Figura 5.9 Comparación de tiempos_2</i> | 108 |
| <i>Figura 5.10 Comparación de tiempos_3</i> | 109 |
| <i>Figura 5.11 Comparación de tiempos_4</i> | 111 |
| <i>Figura 5.12 Comparación de tiempos_5</i> | 112 |
| <i>Figura 5.13 Comparación de tiempos_6</i> | 113 |
| <i>Figura 5.14 Comparación de tiempos_7</i> | 114 |
| <i>Figura 5.15 Comparación de tiempos_8</i> | 115 |
| <i>Figura 5.16 Comparación de tiempos_9</i> | 116 |

Contenido de tablas

| | |
|---|------------|
| <i>Tabla 1.1 Microcontroladores en el mercado.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Tabla 1.2 : Prótesis de rodilla en el mercado (Ortoiberica, 2017)</i> | <i>26</i> |
| <i>Tabla 2.1: Estudio de tipo de prótesis</i> | <i>29</i> |
| <i>Tabla 3.1 Parámetros para el modelo del amortiguador MR (Jiménez, 2002).....</i> | <i>40</i> |
| <i>Tabla 3.2 Resultados prueba preliminar</i> | <i>49</i> |
| <i>Tabla 3.3 Ejemplo de tabla para modelar el amortiguador</i> | <i>61</i> |
| <i>Tabla 3.4 Ejemplo de tabla acotada para modelo del amortiguador</i> | <i>62</i> |
| <i>Tabla 3.5 Calculo de nuevas ecuaciones promedio</i> | <i>62</i> |
| <i>Tabla 3.6 Ejemplo de modelo para obtención de velocidades</i> | <i>64</i> |
| <i>Tabla 4.1 Resultados Prueba 1</i> | <i>67</i> |
| <i>Tabla 4.2 Datos correlación de Pearson-Prueba 1</i> | <i>71</i> |
| <i>Tabla 4.3Desviación Estándar Prueba 1</i> | <i>72</i> |
| <i>Tabla 4.4 Resultados Prueba 2</i> | <i>73</i> |
| <i>Tabla 4.5 Datos correlación de Pearson-Prueba 2</i> | <i>76</i> |
| <i>Tabla 4.6 Comparación de tiempos-Prueba 3</i> | <i>77</i> |
| <i>Tabla 4.7 Ecuaciones en climas fríos</i> | <i>81</i> |
| <i>Tabla 4.8 Ecuaciones en climas cálidas</i> | <i>81</i> |
| <i>Tabla 5.1: Resultados Prueba 1</i> | <i>85</i> |
| <i>Tabla 5.2 Resultados Prueba 1</i> | <i>87</i> |
| <i>Tabla 5.3 Resultados Prueba 1</i> | <i>90</i> |
| <i>Tabla 5.4 Resultados Prueba. 1</i> | <i>92</i> |
| <i>Tabla 5.5 Resultados Prueba 2</i> | <i>95</i> |
| <i>Tabla 5.6 Resultados Prueba 2</i> | <i>97</i> |
| <i>Tabla 5.7 Resultados Prueba 2</i> | <i>99</i> |
| <i>Tabla 5.8 Conjunto 1_Ecu. Amortiguador</i> | <i>101</i> |
| <i>Tabla 5.9 Conjunto 2_Ecu. Amortiguador</i> | <i>102</i> |
| <i>Tabla 5.10 Conjunto 3_Ecu. Amortiguador</i> | <i>103</i> |
| <i>Tabla 5.11 Relación lineal de ecuaciones</i> | <i>104</i> |
| <i>Tabla 5.12 Relación lineal de ecuaciones acotadas</i> | <i>105</i> |
| <i>Tabla 5.13 Nuevas ecuaciones promedio</i> | <i>106</i> |
| <i>Tabla 5.14 Obtención de Velocidades</i> | <i>106</i> |
| <i>Tabla 5.15 Comparación de tiempos -Prueba 3</i> | <i>107</i> |
| <i>Tabla 5.16 Comparación de tiempos -Prueba 3</i> | <i>108</i> |
| <i>Tabla 5.17 Comparación de tiempos-Prueba 3</i> | <i>110</i> |
| <i>Tabla 5.18 Comparación de tiempos-Prueba 3</i> | <i>111</i> |
| <i>Tabla 5.19 Comparación de tiempos-Prueba 3</i> | <i>112</i> |
| <i>Tabla 5.20 Comparación de tiempos-Prueba 3</i> | <i>114</i> |
| <i>Tabla 5.21 Comparación de tiempos-Prueba 3</i> | <i>114</i> |
| <i>Tabla 5.22 Comparación de tiempos-Prueba 3</i> | <i>115</i> |

Introducción

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar el comportamiento de un amortiguador magneteoreológico para ser usado en una prótesis de rodilla semiactiva (Nájera, Diseño de una prótesis de rodilla externa para amputado transfemoral, 2007), dicha prótesis, permitirá recrear la marcha normal en personas con discapacidad de la misma. Por lo tanto, se tratará de conocer cómo se comportaría el amortiguador sujeto a cargas y desplazamientos pequeños de manera experimental, y como resultado se propuso un modelo lineal.

Para caracterizarlo, se inició con una búsqueda en la literatura sobre la marcha humana y sobre los amortiguadores magnetoreológicos. Posteriormente, se decidió realizar pruebas para conocer sus características y se fueron modificando y agregando, considerando factores que influían en el comportamiento del amortiguador, hasta que se obtuvo un modelo, el cual también se probó.

Este trabajo está inspirado por la urgente necesidad, de poder devolverles a las personas la posibilidad de retomar su vida cotidiana, ya que se sabe que existen 780 mil amputados de miembro inferior, según reportes del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en el 2012.

El trabajo se desarrolló con la siguiente estructura:

El capítulo I: Trata sobre cuáles son los ángulos que genera la rodilla para la marcha humana; cuántas fases la conforman; algunos microcontroladores y sus características; algunos tipos de amortiguadores; características del amortiguador magneteoreológico; tipos de prótesis que existen y diferencias entre ellas.

El capítulo II: Indica sobre el problema de movilidad, la hipótesis planteada, las metas y la metodología que se plantea para elaborar el trabajo.

El capítulo III: Explica el uso de un amortiguador magneteoreológico para una prótesis de rodilla, el mecanismo que se realizó, el modelado de este tipo de amortiguadores anteriormente, el modelado para esta aplicación, la realización del banco de pruebas y las pruebas para caracterizarlo.

El capítulo IV: Muestra sobre los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, la discusión, las conclusiones y trabajos a futuros.

Capítulo 1 Antecedentes

1.1) Funciones de la rodilla



Figura 1.1 Radiografía de la rodilla desde plano sagital (Nordin, 2012)

La rodilla es una “articulación de tipo troclear¹”, la cual permite la unión de la articulación tibiofemoral y la rótula (Fig. 1.1). Se considera que es una articulación “eficaz” al permitir la estabilidad del sistema óseo y “vulnerable” porque tiende a sufrir traumatismos (Segal, 1985). Además que es importante en los seres vertebrados bípedos y cuadrúpedos, ya que sus funciones principales son transmitir la carga a todo el cuerpo, ayudar a mantener una posición y permitir el desplazamiento del cuerpo (Nordin, 2012).

La rodilla tiene dos grados de libertad², es decir, puede hacer dos movimientos distintos en dos planos diferentes:

- 1) Flexión y extensión
- 2) Rotación

- Flexión: Es reducir el ángulo entre un segmento fijo y uno movable, en este caso, como se muestra en la figura 1.2, es entre el muslo y pantorrilla generando ángulo de 0° a 120°-130° (Gorrotxategi, 1996).
- Extensión: Es aumentar el ángulo entre las partes posteriores del muslo y pantorrilla generando ángulo de 120°-130° a 0°.
- Rotación: Es un giro que se lleva a cabo con la rodilla flexionada y la tibia, como se muestra en la figura 1.3, aunque, todas las articulaciones que hacen estos movimientos son las articulaciones biaxiales,³ como es el codo y la rodilla. La rotación se divide en dos, las externas, que es casi imposible de realizarla con la rodilla y tibia, cuando se quiere realizar una rotación externa viene desde

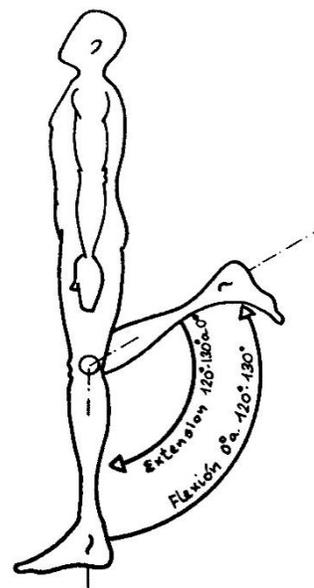


Figura 1.2 Movimiento flexión-extensión (Gorrotxategi, 1996)

¹ Troclear: “Articulación con una de sus superficie (la femoral) en forma de polea” (Segal, 1985).

² Grados de libertad: Es el número de ángulos que se necesitan tomar en cuenta para el estudio de los movimientos del cuerpo (Gowitzke, 2006).

³ Articulaciones biaxiales: Articulaciones que tienen movimiento en dos ejes.

la cadera; mientras que la rotación interna si se puede llevar a cabo por la rodilla y tibia (Gowitzke, 2006).

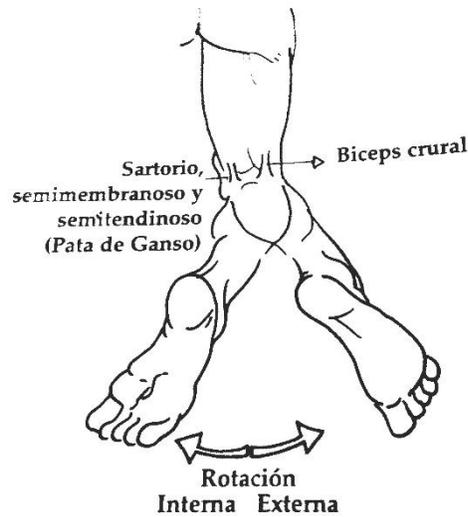


Figura 1.3 Rotaciones articulaciones biaxiales (Gowitzke, 2006)

1.2) Amplitud de movimiento

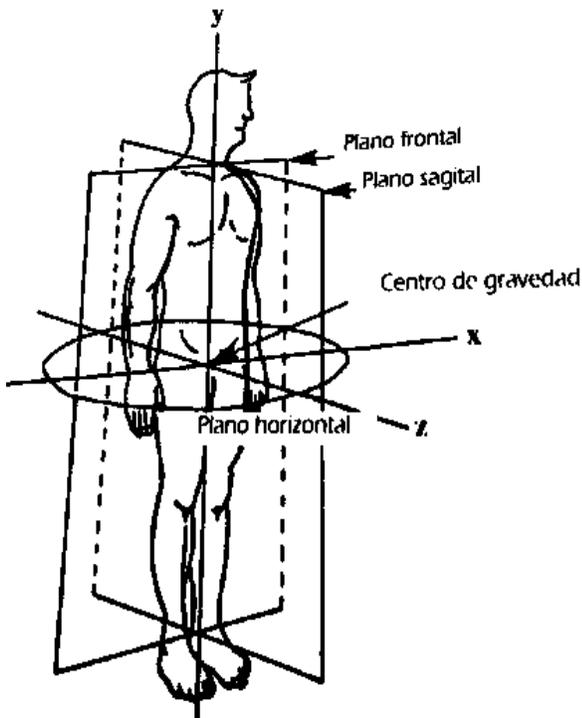


Figura 1.4 Planos anatómicos (System, 2017)

El estudio de los movimientos del cuerpo humano se estudia por medio de los planos anatómicos (Fig. 1.4). Estos planos son tres, los cuales son mutuamente perpendiculares entre sí y tienen un punto de intersección que es el centro de gravedad⁴ (Gowitzke, 2006).

Los planos son:

- Plano Sagital: Divide el cuerpo por la mitad (sección derecha e izquierda). Posibilita movimientos de flexión y extensión.
- Plano Frontal: Divide el cuerpo en sección ventral y dorsal. Posibilita movimientos laterales.

⁴ Centro de gravedad: Es el punto donde todas las fuerzas resultantes del cuerpo se intersectan y tienen algún efecto en ese punto. Este puede variar por la posición de las articulaciones.

- Plano Transversal: Divide el cuerpo a la mitad atravesando el plano frontal por la mitad. Posibilita movimientos rotatorios (System, 2017).

A partir de estudios hechos por “Murray, M.P., Drought”, para obtener el ángulo de flexión de rodilla durante la marcha humana (en sujetos de 20 a 65 años edad), obtuvo los resultados mostrados en la figura 1.5 (Nordin, 2012).

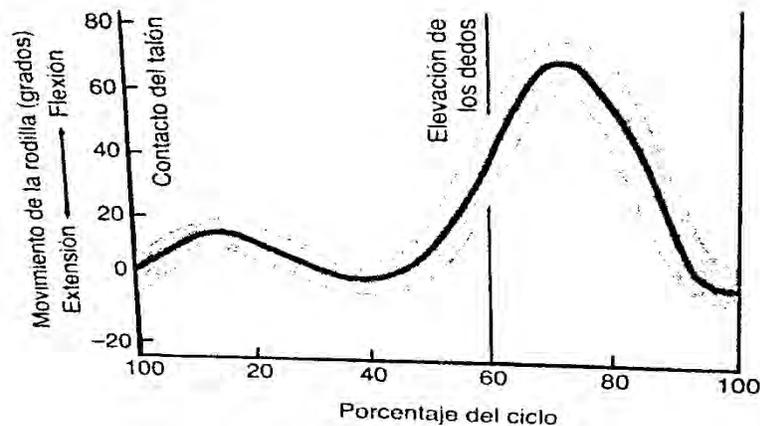


Figura 1.5 Ángulo de flexión rodilla en marcha humana (Nordin, 2012)

La figura 1.6 muestra los ángulos de la rodilla en grados que se conocen al hacer las actividades cotidianas, por lo cual, la prótesis que se implementará tiene que lograr cumplir con esos ángulos (Nordin, 2012).

| Actividad | Amplitud de movimiento desde la extensión de la rodilla hasta la flexión de la misma (grados) |
|---------------------|---|
| Caminata | 0-67 ^a |
| Subir las escaleras | 0-83 ^b |
| Bajar las escaleras | 0-90 |
| Sentarse | 0-93 |
| Atarse las agujetas | 0-106 |
| Levantar un objeto | 0-117 |

Notas:

a: El ángulo puede variar entre las rodillas, las medias encontradas en la rodilla izquierda fue 66.77° la media y la derecha 68.1° la media.

b: Media de 30 pacientes de prueba.

Figura 1.6 Intervalo del movimiento de la articulación tibiofemoral en el plano sagital durante las actividades frecuentes (Nordin, 2012).

1.3) Marcha humana

La marcha humana se puede definir como, "una serie de movimientos alternantes, rítmicos, de las extremidades y del tronco que determinan un desplazamiento hacia delante del centro de gravedad", que es la definición que usó "el Dr. Pedro Vera Luna del Instituto de Biomecánica de Valencia, en su libro *Biomecánica de la marcha humana normal y patológica*" (Nordin, 2012)

El ciclo de marcha se puede dividir en 4 fases, que conforman un ciclo completo de un miembro a otro los cuales son ilustrados en la figura 1.7.

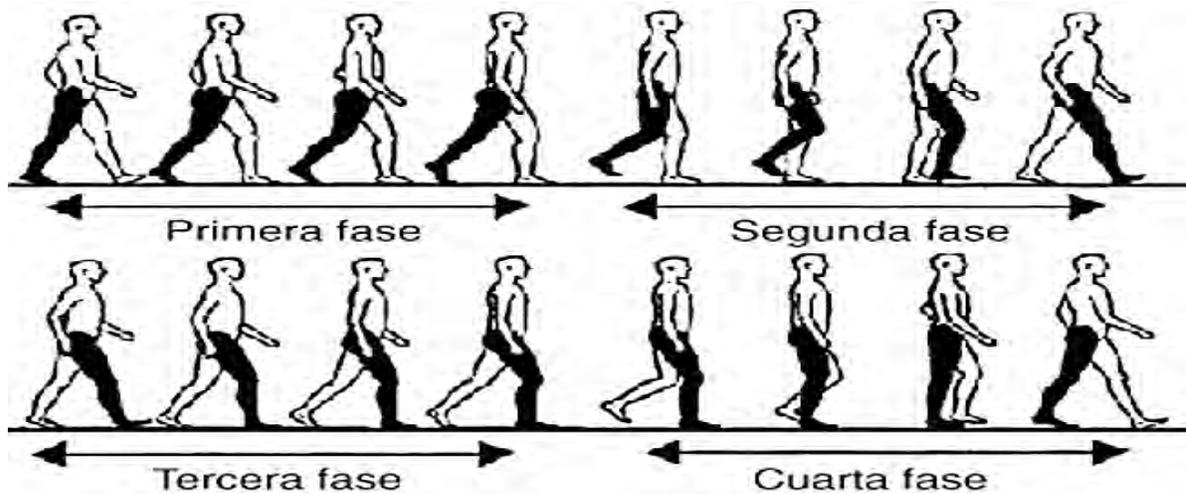


Figura 1.7 Ciclo de la marcha humana (Nordin, 2012)

El análisis de la marcha humana se inicia tomando en cuenta que los miembros inferiores están distanciados entre sí por medio ciclo.

1ª Fase: Esta fase es conocida como "Primer doble apoyo o de despegue". Esta inicia con el miembro inferior atrasado; con el movimiento tibiotarsiano al apoyar los dedos sobre el suelo, lo que genera que se incline hacia adelante la cadera, por lo tanto, la rodilla genera un ángulo de 20° que es entre el fémur y la tibia (todos los ángulos mencionados son entre el fémur y la tibia), siguiendo el movimiento del pie se empezará a levantar el talón y después se despegará el arco del pie, generando un ángulo de 10° aproximadamente, después el cuerpo se incline hacia adelante y la rodilla rebasa la línea de gravedad,⁵ que genera un ángulo de 4° aproximadamente y por último de esta fase, el apoyo total del pie cambie a sólo apoyo de los dedos y se genera un ángulo de 40° aproximadamente. Esta fase corresponde aproximadamente al intervalo de 0-55% del ciclo de la marcha (Fig. 1.8).

⁵ "La línea de gravedad representa una línea vertical imaginaria que atraviesa el centro de gravedad." (Todo sobre el Centro de Gravedad en el Cuerpo Humano, 2015)

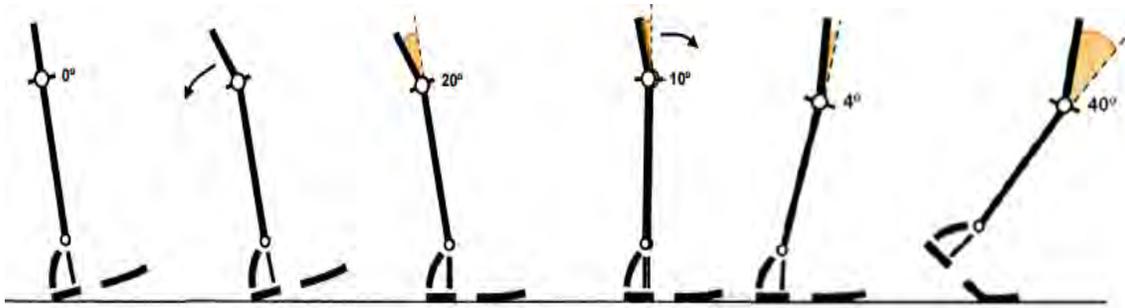


Figura 1.8 Cinemática 1ª fase de la marcha humana (Stengele, 2008)

2ª Fase: Esta fase es conocida como “Período Oscilante” o “Periodo de elevación” o “Primer apoyo unilateral”. Esta inicia con el despegue de los dedos del suelo y la rodilla al levantarse se forma un ángulo de 65° aproximadamente, lo que genera que todo el peso del cuerpo se refleje sobre el miembro contralateral y termina plantando el talón sobre el suelo, generando un ángulo de 10° la rodilla. Esta fase corresponde aproximadamente al intervalo de 55-80% del ciclo de la marcha (Fig. 1.9).

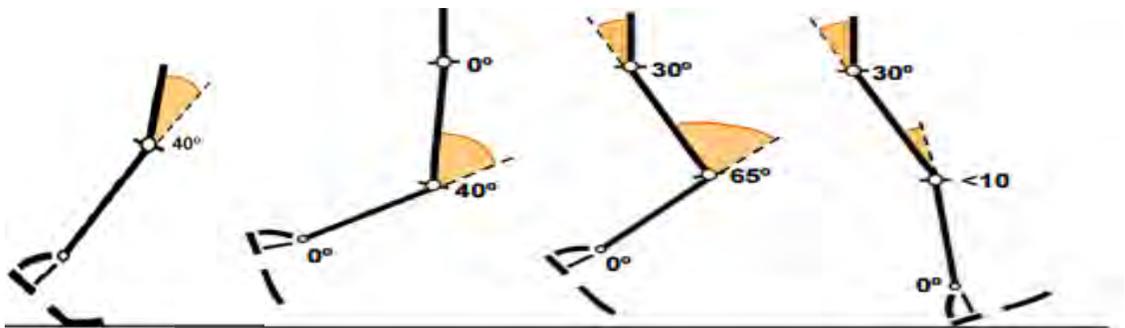


Figura 1.9 Cinemática 2ª fase de la marcha humana (Stengele, 2008)

3ª Fase: Esta fase es conocida como “Fase de impacto del talón” o “Segundo doble apoyo”. Esta fase inicia cuando el talón recibe todo el impacto del cuerpo, el cual, tendrá la función de soportar y regular el peso, lo que permitirá frenar y poner el pie totalmente en el piso nuevamente, generando la distribución del peso total del cuerpo sobre los dos miembros inferiores, por consiguiente, se generará que el miembro inferior ahora sea el contralateral, preparándolo para hacer el movimiento de la articulación tibiotarsiana. Esta fase corresponde aproximadamente al intervalo de 80-95% del ciclo de la marcha (Fig. 1.7, tercera fase).

4ª Fase: Esta fase es conocida como “Segundo apoyo unilateral”. Esta fase inicia cuando el cuerpo cruza de nuevo la línea de gravedad, pero con el nuevo miembro inferior contralateral, generando una rotación pélvica hacia atrás y, por consiguiente, un movimiento contralateral de la cadera, dando inicio a un nuevo despegue. Esta fase corresponde aproximadamente al intervalo de 95-100% del ciclo de la marcha. (Fig. 1.10) (A. Martín Noguerras, 1999).

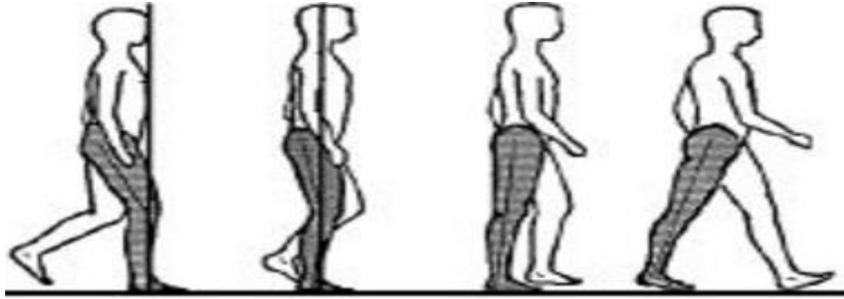


Figura 1.10 Segundo apoyo unilateral (A. Martín Nogueras, 1999)

1.4) Microcontroladores

Un microcontrolador es un circuito integrado (C.I.) que cuenta con tres unidades básicas de una computadora: CPU; memorias; y líneas de comunicación con módulos de E/S.

Están diseñados para realizar tareas similares a una computadora o este se puede convertir en una computadora al sólo agregarle algunos C.I. externos de apoyo, y la gran diferencia que tendría con una computadora sería que permite realizar tareas con el menor número de componentes para cumplirla, menor energía y tamaño (Dispositivos lógicos programables, 2013) (Fig. 1.11).

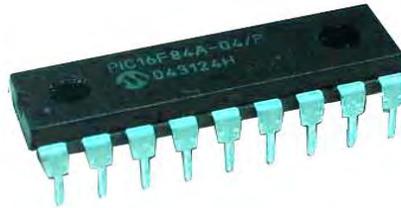


Figura 1.11 Ejemplo de microcontrolador (PIC 16F84A.) (Dispositivos lógicos programables, 2013)

El uso de microcontroladores se ha hecho muy popular al permitir realizar tareas de la vida cotidiana como se muestra en la figura 1.12. Para realizar estas tareas es necesario que el diseñador determine un procesador, los cuales andan desde 4 bits a 64 bits; que permita cumplir todas las especificaciones requeridas.

- ❖ Electrodomésticos: Al no ser difíciles las operaciones al realizar con sólo 4 bits basta para realizar sus operaciones.
- ❖ Industria: Por ejemplo, para los frenos ABS (Antilock Brake System) de un automóvil se necesitan 16 bits.
- ❖ Procesamiento de imágenes: Al tener que ser muy detalladas las imágenes de los pacientes es necesario un procesador de 32 o 64 bits.

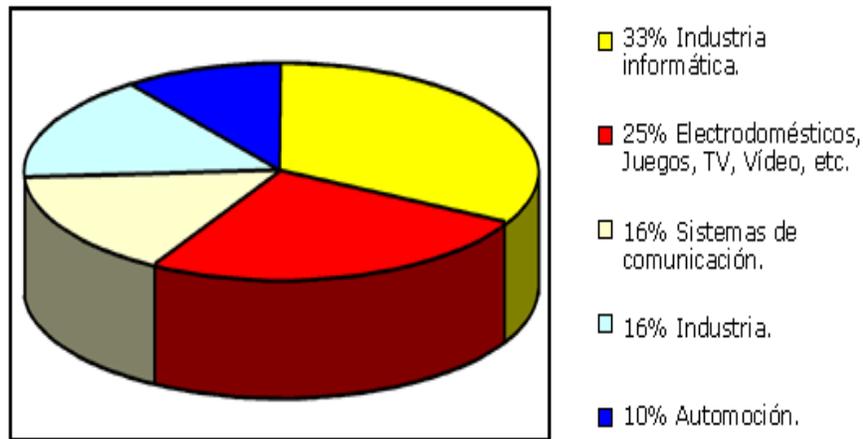


Figura 1.12 Reparto del uso de microcontroladores en las áreas de mayor difusión en el 2013 (Dispositivos lógicos programables, 2013)

Internamente el microcontrolador cuenta con un reloj de sincronización para el sistema; CPU; memoria RAM; y memoria ROM; para funcionar adecuadamente se usa un cristal para la sincronización, programas para controlar los procesos y algunos módulos de E/S como son convertidor de analógico a digital; temporizador; comunicación serial, etc. (Hispanista, s.f.).

El CPU o procesador es de sus partes más importantes al encargarse de recibir y dirigir las instrucciones a ejecutar y almacenar la información. Existen 2 tipos:

- RISC (Reduced Instruction Set Computer): Son procesadores que son para tareas cotidianas al no tener más de 35 instrucciones aproximadamente, por lo tanto, son muy veloces. Un microcontrolador típico de este tipo es el PIC.
- CISC (Complex Instruction Set Computer): Son procesadores que son diseñados para tareas complejas, es decir, que tengan más de 200 instrucciones aproximadamente y casi siempre tienen más de un programa en la memoria local.

La arquitectura es como están constituidas internamente el microcontrolador, es decir, el orden de cómo procesa las instrucciones y los datos. Existen dos arquitecturas, las cuales son:

- Von Neumann: Esta arquitectura ubica la memoria y las instrucciones en el mismo lugar, por lo tanto, usa el mismo bus para las instrucciones y procesar los datos. Y eso hace más lento el tiempo de respuesta, por esa razón ya no es comúnmente usado en microcontroladores (Fig. 1.13).



Figura 1.13 Arquitectura Von Neumann (Ibrahim, 2002)

- Harvard: Esta arquitectura ubica la memoria y las instrucciones en diferentes lados, por lo tanto, usa diferentes buses para transmitir la información y procesarla; aparte de hacerlo simultáneamente, lo que genera que sea más rápido y lo utilicen más microcontroladores (Fig. 1.14) (Ibrahim, 2002).

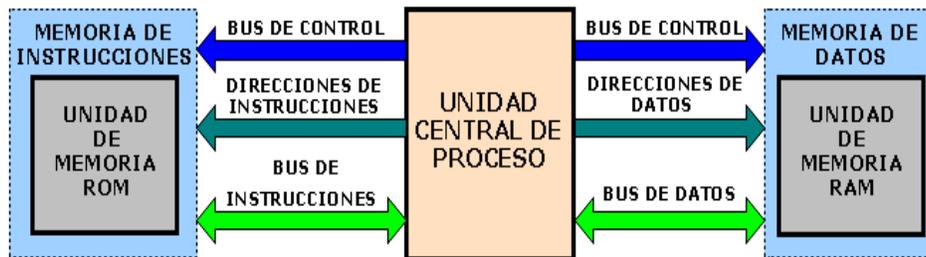


Figura 1.14 Arquitectura Harvard (Ibrahim, 2002)

Algunos microcontroladores en el mercado y sus fabricantes se mencionan en la tabla 1.1, así como sus arquitecturas, IDE, etc.

Tabla 1.1 Microcontroladores en el mercado

| <u>FABRICANTE</u> | <u>FAMILIA</u> | <u>ARQUITECTURA</u> | <u>IDE</u> |
|--|-----------------------|----------------------------|-------------------------|
| Atmel www.atmel.com | AT89xxx | CISC 8 bits 8051 | prog. Independientes |
| | TS87xxx | CISC 8 bits | prog. Independientes |
| | AVR | RISC 8 bits | AVR studio |
| Freescale (Motorola) www.freescale.com | HC05 | CISC 8 bits 6800 | - |
| | HC08 | CISC 8 bits 6809 | Code Warrior |
| | HC12 | CISC 16 bits | - |
| Fujitsu www.fujitsu.com | F2MC-8 | CISC 8 bits | - |
| | F2MC-16 | CISC 16 bits | - |
| | FR | RISC 32 bits | - |

| | | | |
|---|--------------------------|----------------------|---------|
| | C8xxx | CISC 8 bits 8051 | - |
| | C16xxx | CISC 16 bits | - |
| | TCxxx | CISC 32 bits | - |
| Intel www.intel.com | MCS251 | CISC 8 bits 8051 | - |
| | MCS96/296 | CISC 16 bits | - |
| Maxim (Dallas) www.maxim-ic.com | DS80Cxxx | CISC 8 bits 8051 | - |
| | DS83Cxxx | CISC 8 bits 8051 | - |
| | MAXQ | RISC 16 bits | - |
| Microchip www.microchip.com | PIC 10,12,14,16,17,18 | RISC 8 bits | MPLAB |
| | dsPIC | RISC 16 bits | MPLAB |
| NS (NATIONAL SEMICONDUCTOR) www.national.com | COP8xxx | CISC 8 bits | Webench |
| | CR16Cxxx | CISC 16 bits | - |
| | CP3000 | RISC 16 bits | - |
| Philips www.semiconductors.philips.com | P8xxx | CISC 8 bits 8051 | - |
| | Xaxxx | CISC 16 bits | - |
| | LPC2xxx | RISC 32 bits ARM7 | - |
| Texas Instruments www.ti.com | MSC12xxx | CISC 8 bits 8051 | - |
| | MSP430 | CISC 16 bits | Eclipse |
| | TMS470 | RISC 32 bits ARM7 | - |
| Toshiba chips.toshiba.com | 870 | CISC 8 bits | - |
| | 900/900H | CISC 16 bits | - |
| | 900/900H | CISC 32 bits | - |

1.5) Amortiguadores

El amortiguador es un dispositivo que permite disipar energía por medio del desplazamiento de un fluido a través de un conjunto de válvulas internas que generan resistencia al fluido; y su función del amortiguador es disminuir o eliminar las oscilaciones no deseadas.

Clasificación de amortiguadores por fluido de trabajo

La clasificación de amortiguadores por fluido de trabajo es una clasificación que se hace dependiendo del fluido que contenga el amortiguador. Algunos de los amortiguadores son: hidráulico; gas; y reológico.

- *Hidráulico*

El amortiguador hidráulico funciona al permitir el paso de un aceite de la cámara principal hacia la cámara secundaria por medio de unos conductos; y al tener un resorte el cilindro en la cámara principal, retoma la posición inicial después de aplicar la fuerza de carga (Fig. 1.15).

Una ventaja de este tipo de amortiguador es adaptación a fuerzas aplicadas, y una desventaja es la generación de burbujas al tener que responder rápidamente, provocando inestabilidad (Autingo, 2016).

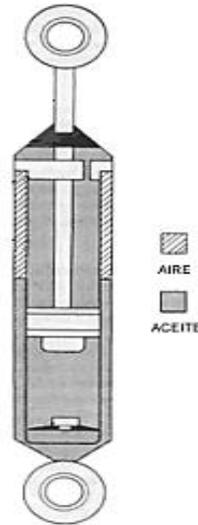
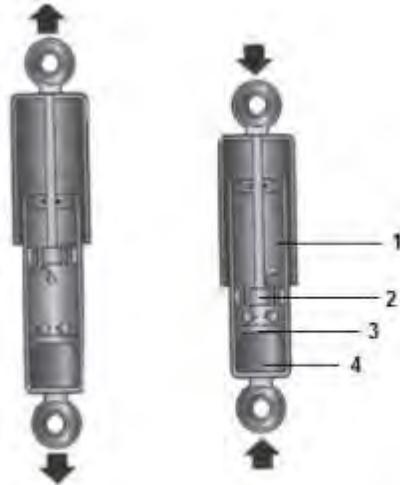


Figura 1.15 Amortiguador hidráulico (Autingo, 2016)

- *Gas*

El amortiguador de gas funciona a partir del movimiento de un pistón que se encuentra en la cámara de aceite, por otro lado, en el otro extremo del cilindro se encuentra una cámara con nitrógeno, donde se encuentra otro pistón; por lo tanto, la separación de los fluidos se debe al pistón flotante, que al ejercerle una fuerza externa, genera otra fuerza en sentido contrario, regresando el amortiguador a su posición original(Fig. 1.16) (Normando, 2016).

Alguna de las ventajas de este tipo de amortiguadores es la prevención de la acumulación de burbujas, y rápida respuesta a la aplicación de fuerzas, pero, es más rígido que otros amortiguadores (Hernandez, 2016).



Esquema de funcionamiento de un amortiguador de gas: 1) Cámara de aceite. 2) Pistón de trabajo. 3) Pistón flotante. 4) Cámara de nitrógeno

Figura 1.16 Amortiguador de gas (Normando, 2016)

- *Reológico*

La reología es el estudio de los flujos y deformaciones de la materia por la aplicación de una fuerza. Para el control de las fuerzas o vibraciones se hace uso de amortiguadores magnetoreológicos ya que permite tener una respuesta rápida a vibraciones y se adapta a las fuerzas por estímulos magnéticos (Garza, 2017).

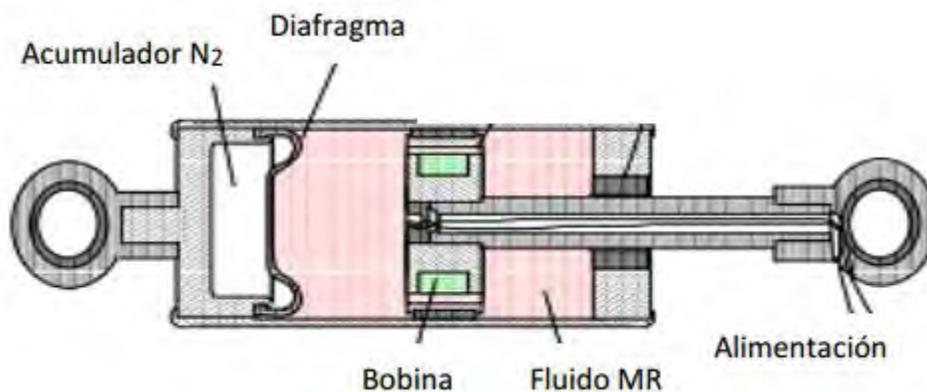


Figura 1.17 Amortiguador magnetoreológico

Estos amortiguadores a diferencia de otros amortiguadores están compuestos por un fluido magnético, el cual, responde a la aplicación de un campo magnético transformando sus propiedades reológicas. Estos fluidos son líquidos que contienen partículas magnéticas,

generalmente son aceites minerales y keroseno. La respuesta de estos fluidos se debe a la “polarización inducida” por campos magnéticos. La interacción entre los dipolos inducidos genera estructuras que son paralelas al campo magnético, lo que conlleva a un cambio de viscosidad del fluido (Fig. 1.18) (Actimat, 2009).

Las ventajas que tienen este tipo de amortiguadores son que tienen diez veces más rápida respuesta ante una fuerza aplicada que otros amortiguadores y no requieren tanto mantenimiento, pero tiene la desventaja de un costo elevado (Consumer, 2007).

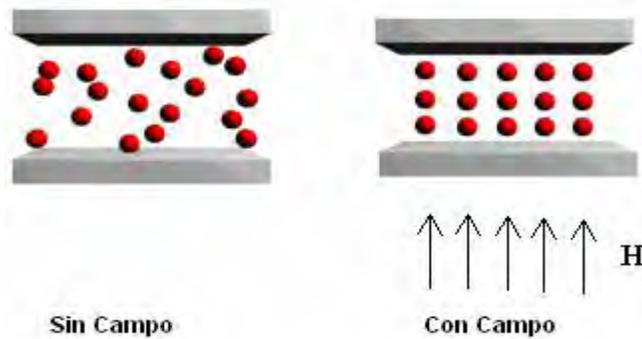


Figura 1.18 Respuesta de fluido magnético a campo magnético (Actimat, 2009)

Algunas propiedades de los fluidos magneteoreológicos se muestran en la figura 1.19 que es la respuesta de la viscosidad en función de la variación de la velocidad de corte y la figura 1.20 muestra la variación de la inducción magnética en función de la intensidad del campo magnético.

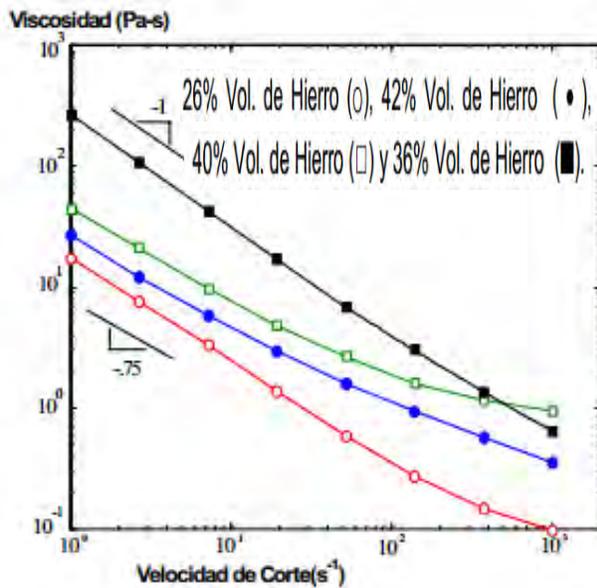


Figura 1.19 Respuesta de viscosidad en función de la velocidad de corte a 25 °C. (Garza, 2017)

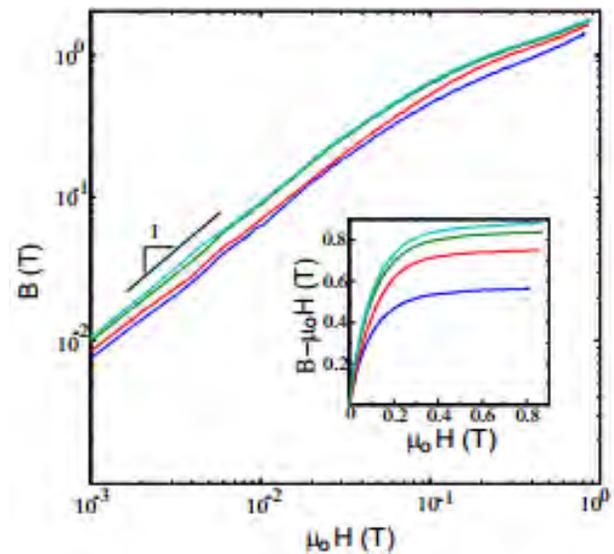


Figura 1.20 Curva de inducción magnética (Garza, 2017)

1.6) Prótesis

Una prótesis es un dispositivo que se usa para compensar la pérdida de un miembro del cuerpo.

Gran parte de las personas que sufren amputación usan prótesis, pero hay algunas personas que no pueden usar debido a factores como su peso, tamaño, o que sufren alguna irritación en la piel con facilidad.

Prótesis de articulación de rodilla

Una prótesis de articulación de rodilla, conocido comúnmente solamente como “prótesis de rodilla” es un dispositivo que sustituye el miembro inferior desde el fémur.

La principal función de una prótesis de rodilla es permitir la estabilidad en la fase de apoyo y permitir la flexo-extensión para poder realizar la marcha humana; y poder sentarse e incorporarse (American Orthopaedic Foot & Ankle Society, 2017).

1.6.1) Tipos de prótesis de rodilla

Al requerir una prótesis de rodilla, se necesita analizar:

- Actividad deseada.
- Tipo de amputación.
- Tamaño.
- Edad del paciente.

Los tipos de prótesis de rodilla son:

- *Rodilla monocéntrica*

Este tipo de prótesis tiene un eje de giro. Realiza los movimientos de la marcha humana a través del siguiente mecanismo: “superficie de fricción; mordaza de fricción; cilindros hidráulicos o frenos de banda; etc.”. También en su mecanismo se incluye a veces sistema de bloque y desbloqueo manual.

Su funcionamiento de flexo-extensión se debe al eje de giro que tiene y para realizar la marcha humana se lleva a cabo por medio del sistema de frenado, el cual es importante para el periodo de apoyo y periodo de oscilación, ya que el sistema de frenado controlará la flexión que tiene la prótesis (Fig. 1.21).

Este tipo de prótesis tiene la ventaja de ser más barata; y necesita menos mantenimiento; la desventaja de este tipo es no contar con control de apoyo, por lo tanto, las personas

se necesitan mantenerse estables con sus propios músculos; así que no se recomienda para personas de edad avanzada.



Figura 1.21 Rodilla monocéntrica (Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, 2003)

- *Rodilla policéntrica*

Este tipo de prótesis tiene un mecanismo que interconecta varios ejes, lo que permite hacer el cambio del centro instantáneo de rotación de la rodilla, el cual, siempre está presente durante la marcha humana, ya que permite cambiar el ángulo de flexión de la rodilla dependiendo de la velocidad. Este tipo de mecanismos puede incluir un sistema independiente que permite controlar las oscilaciones y el margen de ángulos de flexo-extensión. (Fig. 1.22).

Este tipo de sistema ofrece la ventaja de ser muy estable al comienzo de dar el paso, lo que reduce el riesgo de caerse, favoreciendo a pacientes de edad avanzada; ofrece mayor rango dinámico de flexo-extensión algunos modelos, lo que es muy útil para pacientes jóvenes.

La desventaja que tiene este sistema es el costo y necesita mayor mantenimiento.

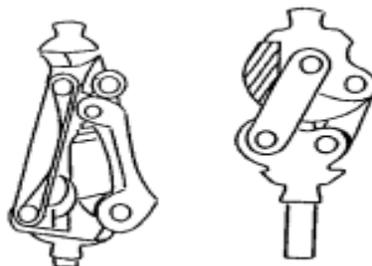


Figura 1.22 Tipos de Rodilla policéntrica (Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, 2003)

- *Rodilla para desarticulación*

Este tipo de prótesis es de tipo policéntrica de cuatro barras el cual va inmediatamente debajo del encaje del muñón, al ser usados en amputaciones donde el fémur se conserva casi en su totalidad.

Estas llevan sistema incorporado con control neumático o hidráulico para generar una respuesta rápida, y mayor estabilidad. A estas se les puede agregar un sistema de bloqueo manual para personas que tienen poca actividad física. (Fig. 1.23) (Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, 2003).



Figura 1.23 Rodilla para desarticulación (Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, 2003)

1.6.2) Clasificación de prótesis de rodilla por control

Es una clasificación en la cual, se define el mecanismo para controlar velocidad de la marcha humana y ángulos de flexión.

- *Rodilla con control neumático*

Este tipo de prótesis puede ser monocéntrico o policéntrico, el cual, tiene un mecanismo incorporado de flexo-extensión por medio de un dispositivo que permite controlar la compresión del aire de un amortiguador de gas, y así, controlar los ángulos de flexión para una marcha más rápida y disminuir de mejor manera las vibraciones (Fig. 1.24).

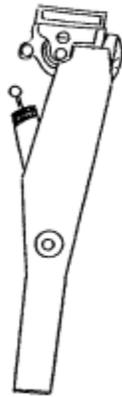


Figura 1.24 Rodilla con control neumático (Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, 2003)

- *Rodilla con control hidráulico*

Este tipo de prótesis puede ser monocéntrico o policéntrico, el cual, tiene un mecanismo incorporado de flexo-extensión por medio de un dispositivo que permita controlar la respuesta del amortiguador, y así, controlar los ángulos de flexión para una marcha mucho más rápida que el neumático; además de contar con un sistema independiente para controlar las vibraciones (Fig. 1.25).



Figura 1.25 Rodilla con control hidráulico (Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, 2003)

1.6.3) Clasificación de prótesis por gasto de energía

Es una clasificación que se les da a las prótesis dependiendo del gasto de energía que puedan tener en el paciente, y las existentes en el mercado son:

- *Pasivas*

Las prótesis pasivas, son casi estéticas, ya que no permiten un buen desarrollo en la marcha humana, producen mucho gasto de energía al paciente al tener que mover la prótesis con su propia fuerza, además como se muestra en la figura 1.26, la prótesis pasiva tiene un ángulo menor de flexión comparado con el ángulo de flexión de la rodilla humana, generando un desbalance en los periodos de oscilación de la marcha humana, por lo tanto, no es recomendable para pacientes de edad avanzada; la única ventaja que tiene sobre otros tipos es lo económico, al ser solamente mecánica (Laurentino, 2011).

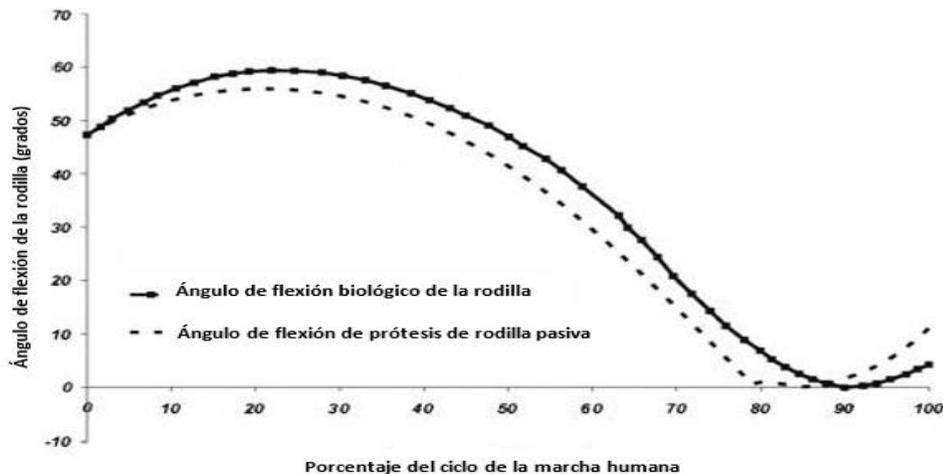


Figura 1.26 Comparación de ángulos de flexión de la rodilla (Laurentino, 2011)

- *Semiactivas*

Las prótesis semiactivas, son una combinación de dos o más sistemas, como puede ser el Electroeológico, Eletroneumático, Magneteoreológico, etc. Lo cual permitirá cambiar algunas propiedades del sistema de manera automática, al estar trabajando los sistemas en conjunto, como la rigidez del amortiguador, velocidad de respuesta, etc.

- *Activas*

Las prótesis activas, son las prótesis que tiene un sistema en conjunto como el semiactivo, pero además tiene un sistema que permite generar su propia energía para poder trabajar de manera automática (Nájera, Diseño del control para una prótesis de rodilla tipo policéntrica (Tesis maestría), 2013).

Algunos tipos de prótesis que existen en el mercado se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 : Prótesis de rodilla en el mercado (Ortoiberica, 2017)

| <u>Modelo</u> | <u>Nombre del modelo</u> | <u>Modelo</u> | <u>Nombre del modelo</u> |
|---|---|--|---|
|  | Rodilla sport Art Leg |  | Plié 2.0. |
|  | Geriátrica de bloqueo |  | Monocéntrica, con bloqueo manual (acero) |
|  | Monocéntrica con freno a la carga (titanio) |  | Policéntrica de fricción |
|  | Monocéntrica, con bloqueo manual (titanio) |  | Rodilla hidráulica para actividades acuáticas |

Capítulo 2 Metodología

Definición del problema de movilidad

Al tener la necesidad las personas de trasladarse de un lugar a otro para realizar actividades cotidianas como ir a trabajar, a la escuela, hacer deporte, etc. Necesitan de sus miembros inferiores, los cuales le ayudan a cubrir esa necesidad, sin embargo, existen problemas para poder moverse de un lugar a otro al haber sufrido algún trauma o tener una enfermedad que impida desplazarse. Como lo menciona Vázquez et al. (2014) en México hay personas que tienen problemas para realizar la marcha, aproximadamente 5 millones de personas se registraron en la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición en el 2014, y de ellos 780 mil tienen amputación reportó el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en el 2012.

Instituciones como el IMSS, CRIT, DIF, INR y hospital militar colaboran en la rehabilitación de las personas en el país, sin embargo, las prótesis fabricadas en el país no superan las 1500 por año, las cuales, son mecánicas y estéticas. Este tipo de prótesis no aseguran la normalidad de la marcha de los individuos. Para lograr una marcha más natural se debe contar con prótesis semiactivas, las cuales, se importan y pueden llegar a costar hasta 600 mil pesos, por lo tanto, es un problema que se debe resolver lo antes posible (Vázquez, 2014).

Hipótesis

Obtener la caracterización de un amortiguador magneteoreológico, permitirá desarrollar el control para prótesis semiactivas de rodilla tipo policéntrica, que ayude a lograr la normalidad de la marcha en personas que han sufrido un trauma.

Metas

- 1) Diseño de experimentos para la caracterización del amortiguador
- 2) Instrumentar banco de pruebas
- 3) Proporcionar una comprensión básica del amortiguador

Metodología

Con la idea de contar con un proceso que permita lograr el objetivo del presente trabajo, se desarrolló una metodología basada en la de Ulrich⁶.

⁶ Autor del libro: Diseño y desarrollo de productos.

Según Ulrich los pasos para desarrollar un plan de un producto son 5 según se muestra en la figura 2.1. De los cuales, se consideraron solamente los últimos cuatro para el presente trabajo, al tener acotado el proyecto que se quiere realizar.

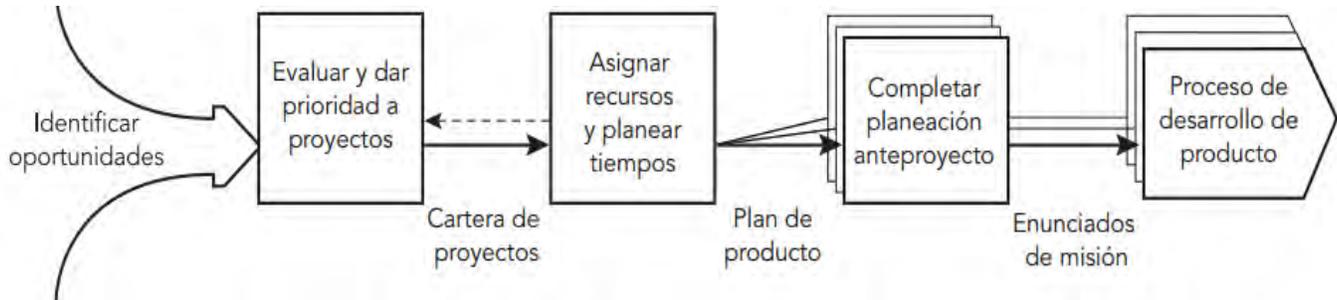


Figura 2.1 Proceso de planeación

- 1) Evaluar proyecto.
- 2) Asignar recursos y planear tiempos.
- 3) Planeación del anteproyecto.
- 4) Reflexionar resultados y proceso.

1) Evaluar proyecto

Para hacer una evaluación del proyecto lo primero que se hizo fue definir una estrategia, a partir de:

- ✓ Estrategia competitiva: Es una estrategia en la cual se hace un estudio de cuáles productos son lo que tienen éxito, para crear similares y poder competir; quiénes son los principales proveedores del producto que se quiere crear; y cuáles son los costos.
- ✓ Trayectoria tecnológica: Es un concepto en el cual, se hace un estudio de qué tecnología se encuentra en el mercado y a partir de esto innovar con el fin de liderar la competencia.

Tabla 2.1: Estudio de tipo de prótesis

| Tipo de prótesis | Características | Ventajas | Desventajas |
|-----------------------------|--|--|--|
| Rodilla Monocéntrica | <ul style="list-style-type: none"> • Tiene un eje de giro. • Cuentan algunos modelos con mecanismos de bloqueo y desbloqueo manual. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Baratas. ✓ Menos mantenimiento. | <ul style="list-style-type: none"> ○ Las personas tiene que tener fuerza en sus músculos para estar estables. ○ No recomendado para personas de 3a edad. |
| Rodilla Policéntrica | <ul style="list-style-type: none"> • Tiene mecanismo que interconecta varios ejes, permitiendo hacer el cambio de centro de rotación de la rodilla, lo que facilita el cambio de velocidad durante la marcha humana | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Mayor estabilidad al comenzar el paso. ✓ Reduce riesgo de caer. ✓ Favorece a pacientes de edad avanzada. ✓ Ofrece mayor rango dinámico de flexo-extensión de rodilla lo que facilita la vida de la gente joven. | <ul style="list-style-type: none"> ○ Mayor costo. ○ Mayor mantenimiento. |

Al evaluar las tecnologías encontradas en la literatura, se determinó que este tipo de proyecto era una aportación en el área estratégica competitiva. Ya que emplean prótesis semiactivas, es posible desarrollar la tecnología para controlar prótesis de rodilla policéntrica, la cuales permiten controlar las diferentes velocidades de marcha que se presentan en la vida diaria, la estabilidad y el riesgo de caída, lo que lleva lograr la normalidad de la marcha.

2) Asignar recursos y planear tiempos.

Este paso es muy importante, porque aquí se define los recursos como son; material, personal, económicos, etc., que se necesita para poder llevar el proyecto, así como conocer si es factible elaborar el proyecto debido al tiempo requerido para su implementación.

En el caso para este proyecto se contaba con los siguientes recursos: estudio previo de prótesis policéntricas, amortiguador, banco de pesas, y se esperaba realizarlo en 12 meses obteniendo un trabajo de tesis.

3) Planeación del anteproyecto.

Cuando el proyecto PAPIIT IT102714 fue renovado por la DGAPA, se hizo una revisión previa de recursos y objetivos, para poder empezar a desarrollar el proyecto.

4) Reflexión de resultados.

Para establecer de manera clara las metas del trabajo se plantaron cuatro preguntas a resolver, (Ulrich, 2013).

- ¿Es viable obtener una prótesis semiactiva utilizando un amortiguador magneteoreológico?
- ¿Se puede determinar una ecuación para caracterizar el amortiguador?
- ¿El amortiguador seleccionado es posible implementarlo en la prótesis policéntrica?
- ¿Cuáles son las variables que influyen durante el control del amortiguador?

Planeación del proyecto

A partir de la información obtenida de la literatura, se realizó la planeación del desarrollo del trabajo y se propuso una metodología. El primer paso consistió en la definición del problema, donde se recabó información sobre los problemas de movilidad que existen en el país; también se investigó sobre los diferentes tipos de prótesis, ventajas y desventajas; se asignó tiempo para la elaboración del proyecto y se hizo una reflexión de los posibles resultados.

Con el primer paso logrado, se definió los requerimientos y las especificaciones de la prótesis semiactiva seleccionada y del amortiguador propuesto. Y se determinó que era necesario estudiar el amortiguador magnetoreológico para conocer su comportamiento, pero no se encontró información completa sobre el funcionamiento del amortiguador, ya que tiene un límite elástico variable, y por lo tanto depende de la aplicación del campo magnético. Y con la idea de conocer dicho comportamiento del amortiguador, se diseñaron experimentos y un banco de pruebas para realizar dichos experimentos, y así, establecer la viabilidad de ser

implantado en la prótesis semiactiva de Nájera (2007). Finalmente, se analizaron los resultados a partir de las cuales se determinó la viabilidad del amortiguador magnetoreológico para la prótesis seleccionada.

Al definir la planeación y el proceso a seguir, se realizó la metodología que define los pasos que se siguieron para lograr las metas establecidas (Fig. 2.2).

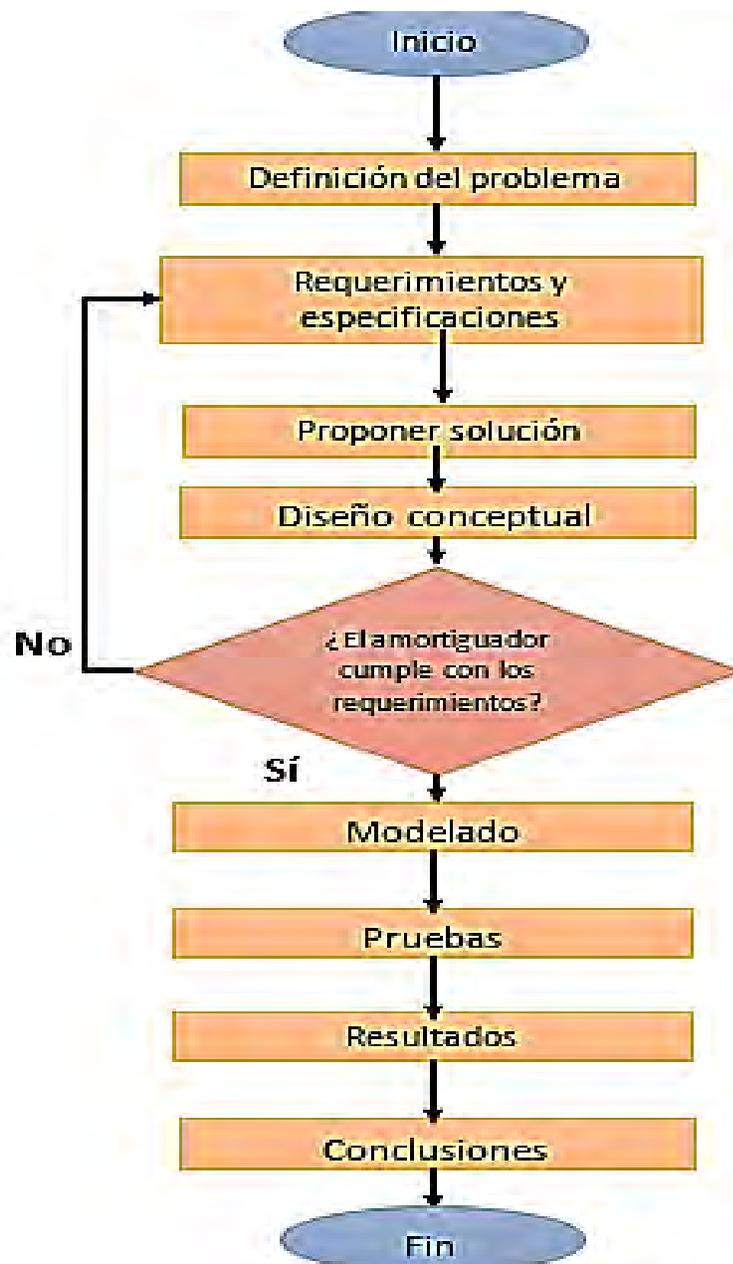


Figura 2.2 Metodología

Capítulo 3 Desarrollo

Introducción

Dados los problemas que existen en el país, como es el de movilidad por amputaciones de miembro inferior, y la baja fabricación de prótesis semiactivas en el país, impide que las personas puedan incorporarse a sus actividades diarias y mejorar su calidad vida, después de la situación traumática que han vivido, sin embargo, dichas prótesis no se encuentran al alcance del mexicano promedio (Vázquez, 2014) ya que se tienen que importar y esto implica un mayor costo. Dada la problemática se propone contar con prótesis semiactivas a mediano plazo, por lo que, se realizó una investigación sobre diseños de prótesis semiactivas de rodilla en el país, lo cual, llevó a encontrar el trabajo de Nájera (2007), quien presentó el trabajo “Diseño de una prótesis de rodilla externa para amputado transfemoral”, donde se propone el uso de un amortiguador magnetoreológico y un diseño mecánico, que tiene los atributos de permitir mayor seguridad al caminar y materiales fáciles de conseguir para su fabricación, sin embargo, tiene pendiente el desarrollo del control de la prótesis (el amortiguador), el cual, es primordial si se quiere una prótesis semiactiva.

3.1) ¿Por qué el uso de un dispositivo semiactivo para una prótesis de rodilla?

Se sabe que fabricantes de prótesis de miembro inferior como es Ottobock utilizan dispositivos semiactivos como el amortiguador MR⁷, lo que permite controlar la flexo-extensión durante la marcha. Y al agregarle un sistema electrónico, conformado por un control de pulsos eléctricos, permite el primer apoyo unilateral de la marcha, donde el peso del cuerpo deberá ser soportado por la prótesis, y el amortiguador al estar con el pulso en alto se opondrá a la carga y tendrá una carrera que permita recrear los ángulos de la rodilla y terminará el pulso cuando finalice la 2ª fase, dando inicio al segundo doble apoyo, generando que el amortiguador regrese a su posición inicial.

Para entender el diseño mecánico propuesto se estudiaron las configuraciones de prótesis propuestas. Donde se creó unos bosquejos de las posibles configuraciones de la prótesis y sus respectivos elementos como son sistema electrónico, mecanismo, amortiguador y acumuladores eléctricos como se muestra en las figuras 3.1 y 3.2.

⁷MR: magnetoreológico

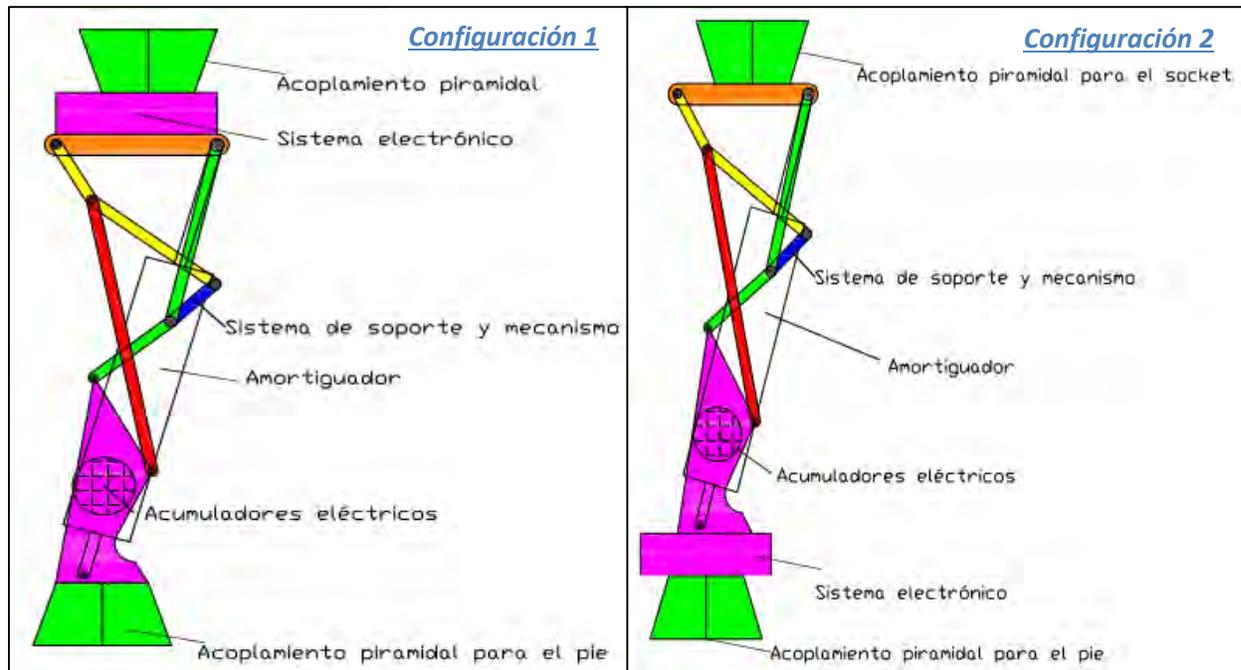


Figura 3.1 Posibles diseños de prótesis (Nájera, 2007)

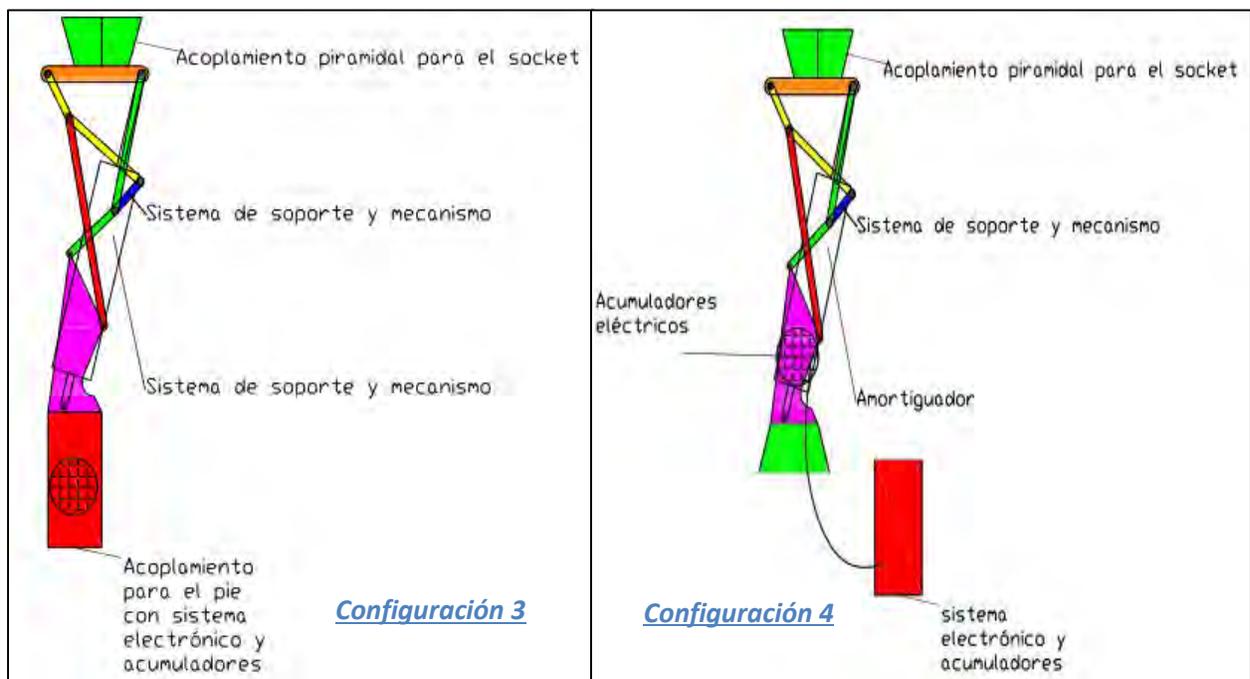


Figura 3.2 Posibles diseños de prótesis (Nájera, 2007)

Dada las configuraciones mostradas anteriormente, se pudo concluir que la configuración 1 no sería lo más adecuado, ya que la pierna con la prótesis y la pierna sana no quedarían al mismo nivel, ya que el sistema electrónico ocupa un espacio encima de la estructura mecánica y desbalancearía la simetría de las piernas.

La configuración 2 y 3 serían las más efectivas en cuanto a su configuración, ya que la configuración 2 muestra el sistema electrónico debajo del sistema mecánico; la configuración 3 utilizaba un acoplamiento, donde incluía el sistema electrónico y ayudaba a acoplar el sistema mecánico y el pie protésico.

La configuración 4 no era adecuada debido a que se tenía que hacer un sistema de comunicación, el cual, tenía que ir en el cinturón y eso no permitía que la persona se sintiera del todo a gusto, ya que debido al cinturón de comunicación recordaría que trae una prótesis (Nájera, Diseño de una prótesis de rodilla externa para amputado transfemoral, 2007).

Debido a los anteriores análisis de los posibles diseños, se llegó a la conclusión que se haría la configuración 3, ya que era más compacto su diseño que el segundo.

Para el proceso de diseño mecánico de la prótesis, se realizó un análisis cinemático para seleccionar los elementos mecánicos que permitieron crear la prótesis. Los cuales podían ser barras, engranes, levas, etc. Ya hecho el estudio, determinó que sería mejor usar un sistema de cuatro barras, debido a que es el sistema que utilizan otras prótesis policéntricas. Conociendo cómo iba a conformarse el mecanismo, con ayuda del software Working Model se realizó el primer dibujo de sistema de 4 barras, como se muestra en la figura 3.3, ya que el software permitió simular el movimiento, pero al ir simulándolo se le fueron haciendo mejoras como fue agregar eslabones, con el objetivo de crear un movimiento más parecido al del cuerpo humano y se le agregó también el amortiguador como se muestra en la figura 3.4.

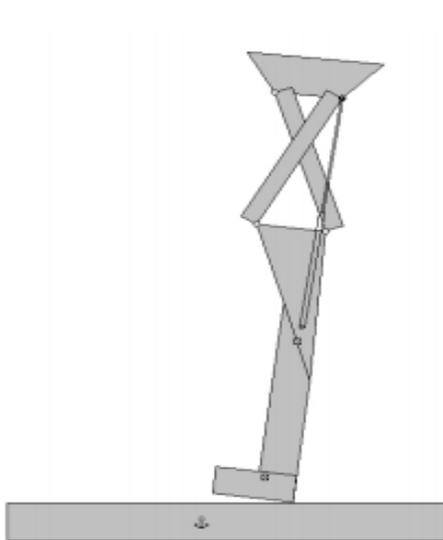


Figura 3.3 Primer Mecanismo Previo (Nájera, 2007)

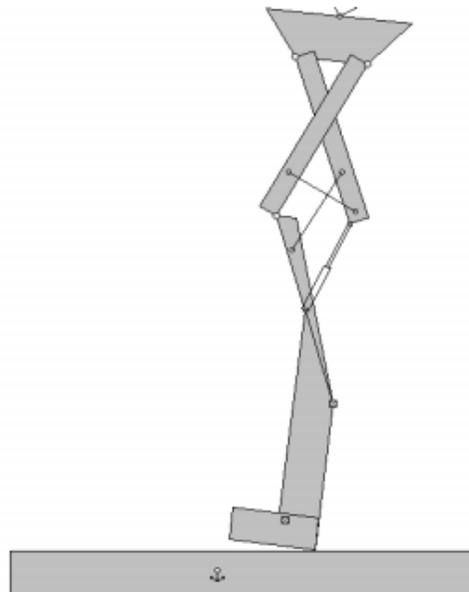


Figura 3.4 Segundo Mecanismo Previo (Nájera, 2007)

Para los cálculos se utilizó la ecuación de Kutzbach, la cual permitió obtener los grados de libertad de la estructura, y con ayuda del software Mathematica se obtuvieron los valores, los cuales permitieron recrear en Working Model un modelo más completo, como se muestra en la figura 3.7.



Figura 3.7 Modelo mecánico final (Nájera, 2007)

Después de conocer el mecanismo que se utilizaría, se llevó a cabo un análisis de materiales y sus respectivas simulaciones, donde se determinó que el indicado sería aluminio con un espesor de 6 mm para el mecanismo, lo que permitiría cumplir con las características para poder soportar el peso de una persona de hasta 120 kg (fig. 3.8).

Conociendo el mecanismo que se iba a implementar, el material y los grados de libertad que tenían las piezas. Se hizo un modelo virtual, donde se diseñó el soporte del amortiguador, y se llegó que se necesitaba dos paredes laterales al actuador y una carcasa para mantener al actuador y el mecanismo funcional, después de analizar el diseño virtual se fabricó un prototipo funcional, como se muestra en la figura 3.9.

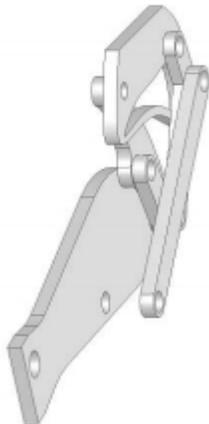


Figura 3.8 Mecanismos de barras (Nájera, 2007)

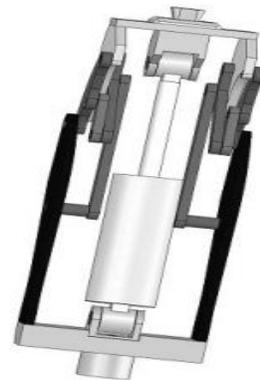


Figura 3.9 Isométrico de prototipo final (Nájera, 2007)

3.2) Condiciones de uso de la prótesis

Las condiciones para que la prótesis permita recrear la marcha humana son:

- Variar velocidad de 0 a 5.5 km/h.
- Peso de prótesis máximo 60% del miembro sano.

Para cumplir las condiciones de marcha con la prótesis, se investigaron las especificaciones del amortiguador, como son el modelo, proveedor, características de funcionamiento, etc. Para ello se desensambló el sistema mecánico como se muestra en la figura 3.10, para poder observar las características del amortiguador. Y se conoció el modelo del amortiguador hasta en entonces, por lo que se contactó al fabricante de donde se obtuvo la siguiente información:

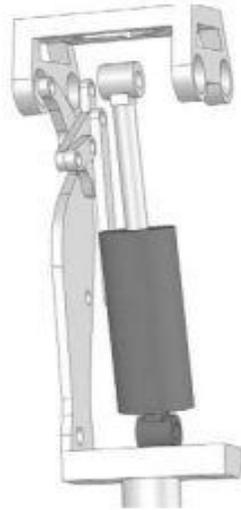


Figura 3.10 Prótesis de rodilla (Nájera, 2007)

- ✓ **Proveedor:** LORD Corporation.
- ✓ **Modelo:** RD-1005-3 (MR Lineal Control).
- ✓ **Especificaciones:**
 - ❖ 2 [A] máximo con ciclos intermitentes.
 - ❖ Bobinas con resistencia de 4.5 [Ω].
 - ❖ Tiempo máximo de trabajo 15 min a 2[A].
 - ❖ Límite de corriente recomendado 1 [A]. (LORD, 2015).

3.3) Trabajos sobre el amortiguador magneteoreológico

En los últimos años, se ha propuesto el uso de dispositivos semiactivos, como el amortiguador MR para sistemas estructurales, que trabajan con poca energía de alimentación y disipan energía cinética proveniente de las vibraciones provocadas por sismos. Sin embargo, el problema que han enfrentado los investigadores es determinar el modelo matemático de dichos amortiguadores, ya que estos tienen un comportamiento no lineal, al presentar un ciclo de histéresis. Por ello Dyke et. al. (1996), caracterizaron el amortiguador MR sísmico de la empresa Lord Corporation, modelo MRD-9000 (Fig. 3.11), en donde se propuso un modelo para su control basándose en el modelo de Bouc-Wen (Fig. 3.12).

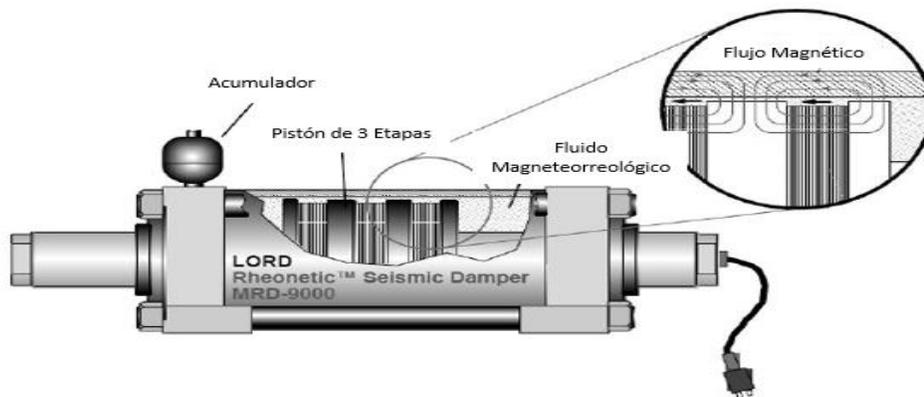


Figura 3.11 Amortiguador Sísmico MR (Jiménez, 2002)

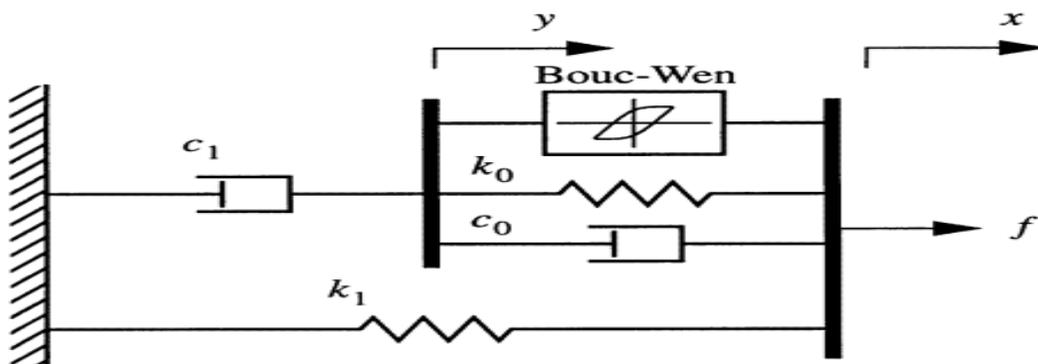


Figura 3.12 Modelo mecánico del amortiguador MR de Bouc-Wen (Jiménez, 2002)

$$f = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) \quad 3.1)$$

o su equivalente: $f = c_1\dot{y} + k_1(x - x_0) \quad 3.2)$

donde la evolución de la variable “z” y “y” es gobernada por:

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)} \{ \alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x - y) \} \quad 3.3)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| |z|^{n-1} - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad 3.4)$$

Los parámetros de las ecuaciones son los siguientes:

- f es la fuerza que ejerce el amortiguador.
- x= desplazamiento relativo de un extremo del amortiguador.
- x0 = desplazamiento inicial del resorte asociado a la fuerza del amortiguador debido al acumulador k1.
- y= estado interno que produce efectos de desplazamiento.
- k1 = rigidez del acumulador.
- c0 = viscosidad del amortiguador en mayores velocidades.
- c1 = amortiguador que se incluye en el modelo para introducir el efecto de la fuerza-velocidad.
- k0 = es el control de rigidez en mayores velocidades.

Los parámetros γ , β y A mostrados en la ecuación (3.4) permiten controlar la forma del ciclo de histéresis de los elementos del amortiguador MR.

Para considerar las variaciones del fluido MR, Dyke et al. propusieron las relaciones siguientes:

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad 3.5)$$

$$c_1 = c_1(u) = c_{1a} + c_{1b} u \quad 3.6)$$

$$c_0 = c_0(u) = c_{01} + c_{0b} u \quad 3.7)$$

donde: α_a , α_b , c_{1a} , c_{1b} , c_{0a} y c_{0b} son constantes y “u” es la salida de primer orden del filtro y “v” es el voltaje de control (ecu. 3.8).

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad 3.8)$$

La ecuación (3.8) permite modelar la dinámica para lograr el equilibrio reológico.

La forma en que se obtuvieron los 14 parámetros del modelo de la ecuación (3.1) a la (3.8), es por medio del método de programación secuencia cuadrática realizada en MATLAB (Dyke, 1996).

Los valores mostrados en la tabla 3.1 son los parámetros obtenidos del algoritmo aplicado.

Tabla 3.1 Parámetros para el modelo del amortiguador MR (Jiménez, 2002)

| PARÁMETRO | VALOR | PARÁMETRO | VALOR |
|-----------|---|------------|--|
| C_{0A} | 21 N s cm ⁻¹ | α_a | 140 N s cm ⁻¹ |
| C_{0B} | 3.5 N s cm ⁻¹ V ⁻¹ | α_b | 695 N s cm ⁻¹ V ⁻¹ |
| K_0 | 46.9 N cm ⁻¹ | γ | 363 cm ⁻² |
| C_{1A} | 283 N s cm ⁻¹ | β | 363 cm ⁻² |
| C_{1B} | 2.95 N s cm ⁻¹ V ⁻¹ | A | 301 |
| K_1 | 5.00 N cm ⁻¹ | n | 2 |
| X_0 | 14.3 cm | η | 190 s ⁻¹ |

Para validar el modelo de Dyke et al. implementaron un experimento que se basa en el esquema de la figura 3.13, en el cual, se observa que el amortiguador está en posición horizontal, uno de sus extremos está fijo a una superficie de la estructura, además se observa que el experimento tiene la finalidad de conocer las aceleraciones de los planos (\ddot{x}_{a1} , \ddot{x}_{a2} , \ddot{x}_{a3}) y la base (\ddot{x}_g), así como el desplazamiento del plano conectado al amortiguador (x_1) y la fuerza que la estructura transmite al amortiguador (f), y los parámetros son adquiridos por una computadora.

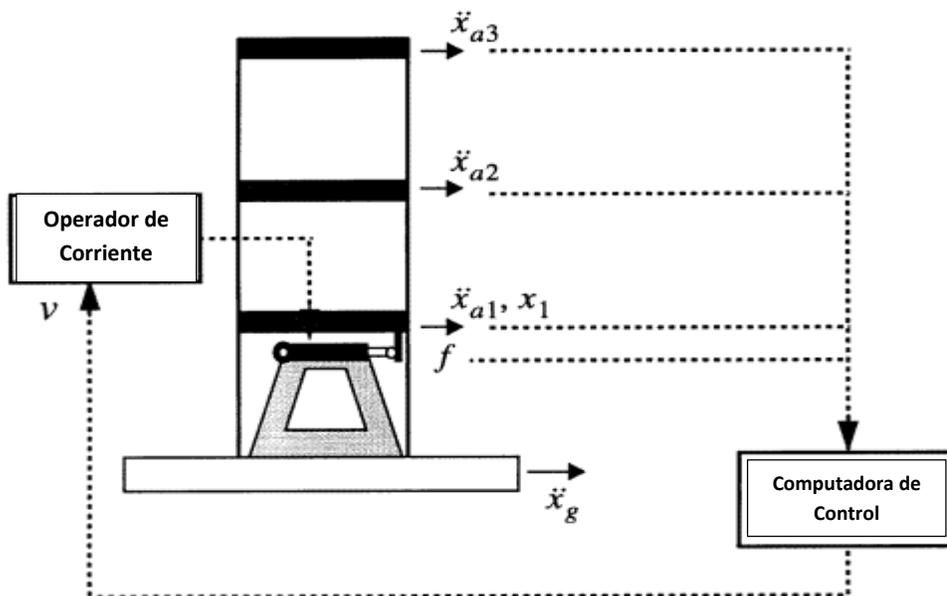


Figura 3.13 Diagrama de Implementación de experimento amortiguador MR (Jiménez, 2002)

Los resultados obtenidos del experimento se muestran en la figura 3.14, la cual se muestran los gráficos de Fuerza vs Tiempo y Fuerza vs Velocidad, de donde se puede observar que para obtener una mejor respuesta en cuanto fuerza y velocidad, es recomendable aplicar más voltaje, tomando en cuenta que al aumentar el voltaje, la fuerza para que el fluido ceda también se incrementa, por lo tanto, se puede ver la viscosidad del fluido del amortiguador como un plástico de Bingham (Dyke, 1996).

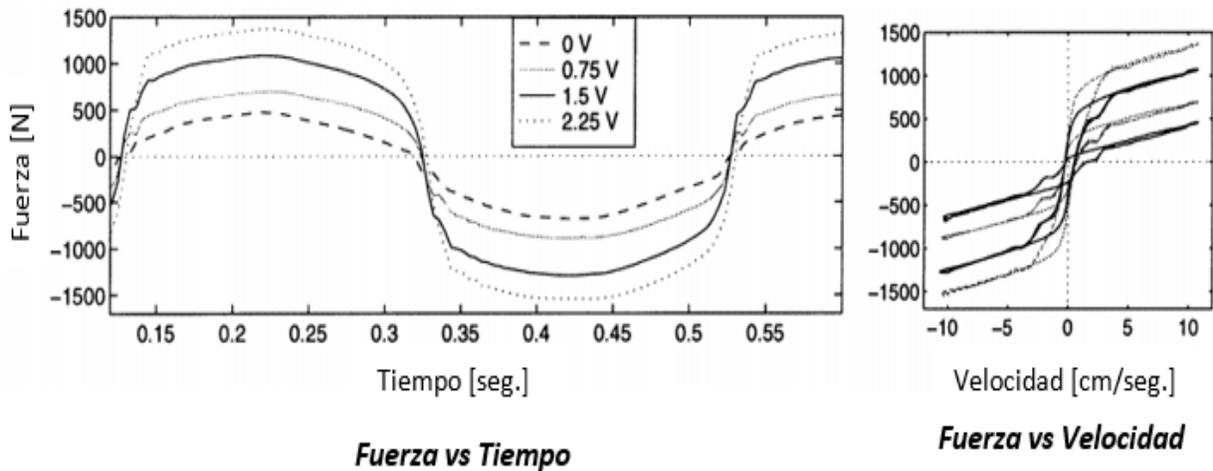


Figura 3.14 Respuesta del amortiguador MR (Jiménez, 2002)

En la figura 3.15 se observa que los resultados experimentales (barra gris) y los obtenidos utilizando el modelo de Bouc-Wen (barra negra) son muy similares.

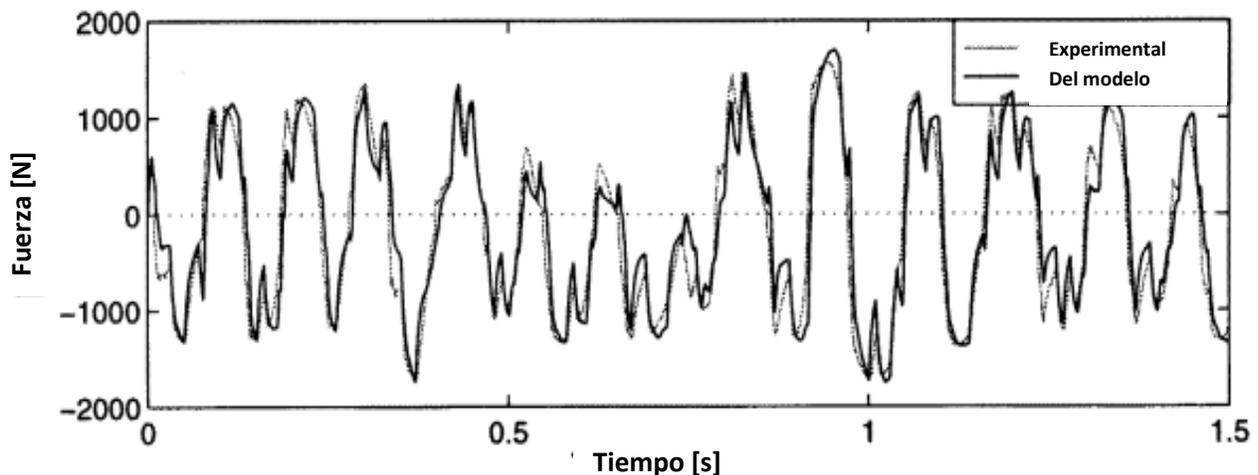


Figura 3.15 Fuerza vs Tiempo (Jiménez, 2002)

Otro ejemplo aplicado a este tipo de amortiguadores es el realizado por Jiménez (2002) en “Control semiactivo de estructuras civiles utilizando amortiguadores magneto-reológicos”, quien, basándose en Dyke et. al. (1996), determina que hay una manera más sencilla de modelar el mismo amortiguador, basado en el modelo de fricción de LuGre, ya que incluye las variaciones no lineales del amortiguador, así como su efecto de histéresis.

El modelo de LuGre tiene las siguientes ecuaciones:

$$f = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \dot{x} \quad 3.9)$$

$$\dot{z} = \dot{x} - \sigma_0 a_0 |\dot{x}| z \quad 3.10)$$

donde:

- f es la fuerza que ejerce el amortiguador.
- \dot{x} es la velocidad entre los extremos del amortiguador.
- z describe el estado interno del fluido.
- $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$ y a_0 son parámetros constantes.

Al ser un amortiguador MR, Jiménez (2002) tuvo que involucrar el campo magnético que interactúa con el fluido magnetorreológico, por lo que considera en las ecuaciones la corriente suministrada a la bobina del amortiguador y la intensidad del campo, lo cual, es proporcional al voltaje que se le aplica.

Y las ecuaciones (3.9) y (3.10) se modifican quedando de la siguiente manera:

$$f = \sigma_0 z v + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \dot{x} \quad 3.11)$$

$$\dot{z} = \dot{x} - \sigma_0 a_0 |\dot{x}| z (1 + a_1 v) \quad 3.12)$$

donde:

- f es la fuerza que ejerce el amortiguador.
- \dot{x} es la velocidad entre los extremos del amortiguador.
- z describe el estado interno del fluido.
- $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, a_0$ y a_1 son parámetros constantes.
- v es el voltaje aplicado al amortiguador.

Al sustituir la ecuación (3.12) en (3.11) se obtiene la (3.13)

$$f = \sigma_0 z v - \sigma_0 \sigma_1 a_0 |\dot{x}| z - \sigma_0 \sigma_1 a_0 a_1 |\dot{x}| z v + (\sigma_1 + \sigma_2) \dot{x} \quad 3.13)$$

Considerando los siguientes coeficientes:

$$\theta_1 = \sigma_0 , \quad 3.14)$$

$$\theta_2 = \sigma_0 \sigma_1 a_0 , \quad 3.15)$$

$$\theta_3 = \sigma_0 \sigma_1 a_0 a_1 , \quad 3.16)$$

$$\theta_4 = \sigma_1 + \sigma_2 , \quad 3.17)$$

El modelo propuesto puede reparametrizarse como: $f = U\theta$ 3.18)

donde: $U = [zv, -|\dot{x}|z, -|\dot{x}|zv, \dot{x}]$ 3.19)

y

$$\Theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T . \quad 3.20)$$

Una vez parametrizado el modelo (ecu. 3.18), se realizan simulaciones con un algoritmo de mínimos cuadrados recursivo con factor de olvido, con el fin de obtener los valores de los parámetros.

Para evaluar la competencia del modelo propuesto, se usó el algoritmo mencionado con las siguientes condiciones iniciales:

$$\sigma_2 = 2300 \text{ [kg/s]} \text{ y } \hat{\theta}_0 = [20 \ 20 \ 20 \ 20]^T \quad 3.21)$$

El cual, obtuvo los siguientes valores:

$$\hat{\theta} = 10^4 x [1.059 \ 0.181 \ -0.026 \ 0.008]^T \quad 3.22)$$

Con los valores obtenidos de la ecuación 3.22), se obtuvo una señal de entrada donde el desplazamiento x [m] y el voltaje v [V] son:

$$x = 0.0115 \sin(8.6 \pi t)$$

$$v = 1.25 \sin(10.2 \pi t) + 1.25$$

Para evaluar la competencia del modelo propuesto, se utilizó el modelo de Bouc-Wen para generar una señal de referencia de fuerza (f) con los parámetros obtenidos por Dyke (1996), mostrados en la tabla 3.1.

Con la señal de referencia y la señal del modelo propuesto se realizó una simulación donde se observa que son parecidos los resultados (fig. 3.16).

Sin embargo, quedó pendiente obtener datos experimentales para validar el modelo del amortiguador (Jiménez, 2002).

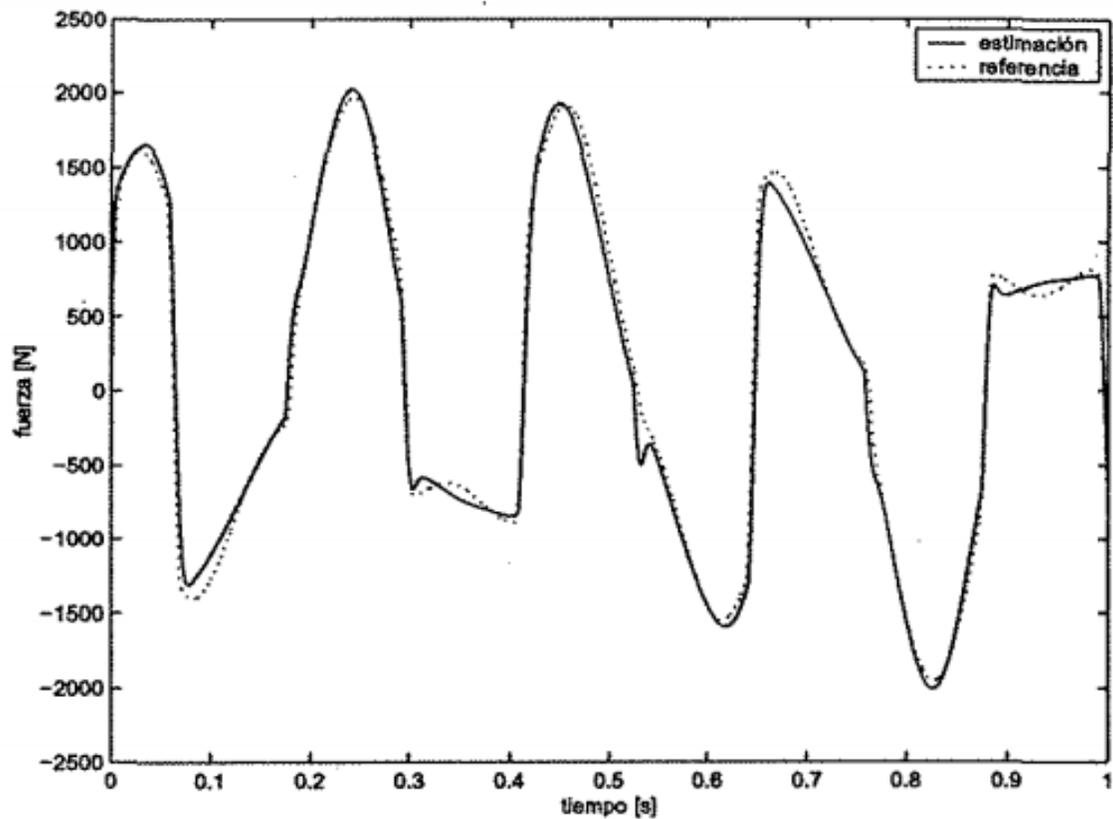


Figura 3.16 Respuesta del modelo propuesto del amortiguador (Jiménez, 2002)

Resumen

La aplicación de los MR según se observa en la literatura, es disipar la energía cinética en un corto tiempo. Para desarrollar un modelo de control es necesario conocer los desplazamientos, velocidades y aceleraciones, a partir de los cuales es posible obtener señales de entrada características del fenómeno. La energía cinética que es disipada en forma de calor, provoca que se alcance la temperatura de Curie, lo que implica que el fluido MR varíe sus propiedades ferromagnéticas como resultado de la agitación térmica, afectando la viscosidad del fluido y cambiando el tiempo de amortiguación. Una ventaja de usar señales de entrada periódicas en el amortiguador MR, como se ha observado en los trabajos descritos, es mantener la posición de trabajo aplicando voltaje variable, esto debido al ciclo de histéresis, lo que prolonga el tiempo de trabajo antes de alcanzar la temperatura de Curie.

Para el caso de estudio del presente trabajo, el amortiguador tendrá otro comportamiento, al tener un ciclo de trabajo cada tres segundos aproximadamente, a diferencia de los casos estudiados, donde se tiene hasta seis ciclos de trabajo en un segundo. Es decir, los desplazamientos son constantes, las velocidades y aceleraciones son bajas

En virtud de lo anterior, se propone obtener un modelo lineal y sencillo que describa el comportamiento del amortiguador, para obtener dicho modelo, se tratará de determinar una región lineal en la curva de histéresis, sin llegar a la parte de saturación, lo que implicaría trabajar con corrientes no mayores a 2 A, lo cual coincide con los datos del fabricante que recomienda no sobrepasar este límite.

Diseño Conceptual

Para lograr que el amortiguador soporte el peso del cuerpo durante el primer apoyo unilateral en la marcha, y dado que se requiere un modelo lineal y sencillo se propone el control de pulsos eléctricos. Donde un pulso en alto permitirá que se comprima el amortiguador alrededor de 2.3 cm, lo que la prótesis alcanzará un ángulo aproximado de 59°, posición angular que se aproxima al ángulo de la rodilla sana en esta fase. Y al finalizar el pulso, el amortiguador se desenergizará, originando que regrese a su posición inicial, y así, iniciar con el segundo doble apoyo de la marcha.

Banco de pruebas preliminar

Al conocer las condiciones de uso de la prótesis, especificaciones del amortiguador y al no tener estudios del mismo, se tratará de caracterizarlo, es decir, conocer el voltaje, corriente, fuerza que soporta y distancia que se retrae al oponerse a una carga, con el fin de recrear la marcha humana. Por ello, se realizó un banco de pruebas preliminar, mostrado en la figura 3.17 con la idea de entender su comportamiento.



Figura 3.17 Banco de pruebas preliminar

Dada que la aplicación del amortiguador es recrear la marcha humana, el banco de pruebas (fig. 3.17) requiere soportar cargas de compresión y pequeños desplazamientos, por lo que se debe contar con un soporte, que permita mantener el amortiguador de manera vertical; un banco de carga para simular el peso de la persona; una fuente de poder para alimentar el amortiguador; una cinta métrica para medir el recorrido del vástago, cuando se le aplica un peso y un cronómetro para medir el tiempo que tarda en comprimirse.

Prueba preliminar

Objetivo

Conocer rango de voltajes para el amortiguador, la distancia de estabilización⁸ al aplicarle carga, y el tiempo que tarda en recorrer dicha distancia. Así como, encontrar la relación entre las variables independientes (voltaje y masa) y dependientes (corriente, distancia y tiempo).

Desarrollo:

Se aplica un peso de 16 kg y se energiza el amortiguador a 1 V, hasta llegar a los 28 kg con 4 V de energía, con aumentos de 4 kg y 1 V entre cada experimento.

Se empieza desde 16 kg al ser el mínimo donde se observa que el amortiguador se comprime y se finaliza en 28 kg.

Material:

- Amortiguador MR.
- Soporte.
- Cables banana-caimán.
- Cronómetro.
- Fuente de poder.
- Banco de pesas.

⁸ Distancia de estabilización: Es la distancia máxima que se desplaza el vástago del amortiguador.

Procedimiento:

- 1) Colocar el amortiguador en el soporte, manteniéndolo vertical y sin movimiento.
- 2) Energizarlo con la fuente de poder a 1V, incrementando el voltaje entre cada experimento 1 V hasta llegar a 4 V.
- 3) Colocar un peso de 16 kg e incrementar el peso entre cada experimento 4kg hasta alcanzar 28 kg. (una pesa es, de 4 Kg).
- 4) Al colocar el peso, se inicia el cronómetro, con el fin de conocer el tiempo de la distancia de estabilización.
- 5) Al alcanzar la distancia de estabilización se detiene el cronómetro y se toma la lectura.
- 6) Retirar el peso que soporta el amortiguador sin desenergizarlo para poder medir la distancia de estabilización.
- 7) Desenergizarlo para que regrese a su posición original el vástago.
- 8) Repetir del paso 2 al 7.

Se realizaron cuatro experimentos y dos réplicas de cada uno de ellos.

Se aumentó sólo el peso a 28 kg, debido a medidas de seguridad, porque se pueden caer las pesas provocando un accidente.



Figura 3.18 Ejemplo de prueba preliminar

Resultados:

Se obtiene con los valores que se registran en la tabla 3.2 (voltaje, corriente, masa, distancia desplazada y tiempo) y obteniendo los gráficos de voltaje vs distancia y tiempo, masa vs distancia y tiempo (fig. 3.19 a 3.24).

Tabla 3.2 Resultados prueba preliminar

| Comportamiento Inicial | | | | |
|-------------------------------|---------------|-----------|---------------------------|------------|
| <u>Conjunto Exp. 1</u> | | | | |
| VOLTAJE [v] | CORRIENTE [A] | MASA [KG] | Distancia Desplazada [cm] | Tiempo [s] |
| 1 | 0.13 | 16 | 0.3 | 0.5 |
| 2 | 0.35 | 20 | 3 | 190 |
| 3 | 0.53 | 24 | 4.2 | 150 |
| 4 | 0.72 | 28 | 1.8 | 74 |
| <u>Conjunto Exp. 2</u> | | | | |
| VOLTAJE [v] | CORRIENTE [A] | MASA [KG] | Distancia Desplazada [cm] | Tiempo [s] |
| 1 | 0.18 | 16 | 0.3 | 0.3 |
| 2 | 0.35 | 20 | 3.2 | 182 |
| 3 | 0.53 | 24 | 4.5 | 135 |
| 4 | 0.72 | 28 | 1.8 | 76 |
| <u>Conjunto Exp. 3</u> | | | | |
| VOLTAJE [v] | CORRIENTE [A] | MASA [KG] | Distancia Desplazada [cm] | Tiempo [s] |
| 1 | 0.21 | 16 | 0.3 | 0.3 |
| 2 | 0.41 | 20 | 3.3 | 179 |
| 3 | 0.65 | 24 | 3.6 | 125 |
| 4 | 0.81 | 28 | 2.6 | 93 |

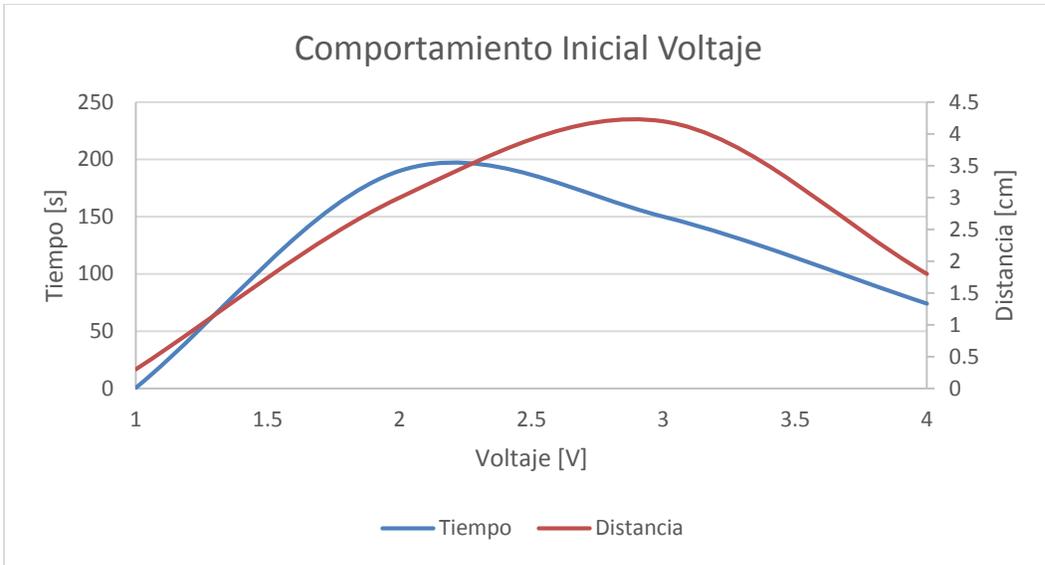


Figura 3.19 Comportamiento de voltaje-Cjto. Exp. 1

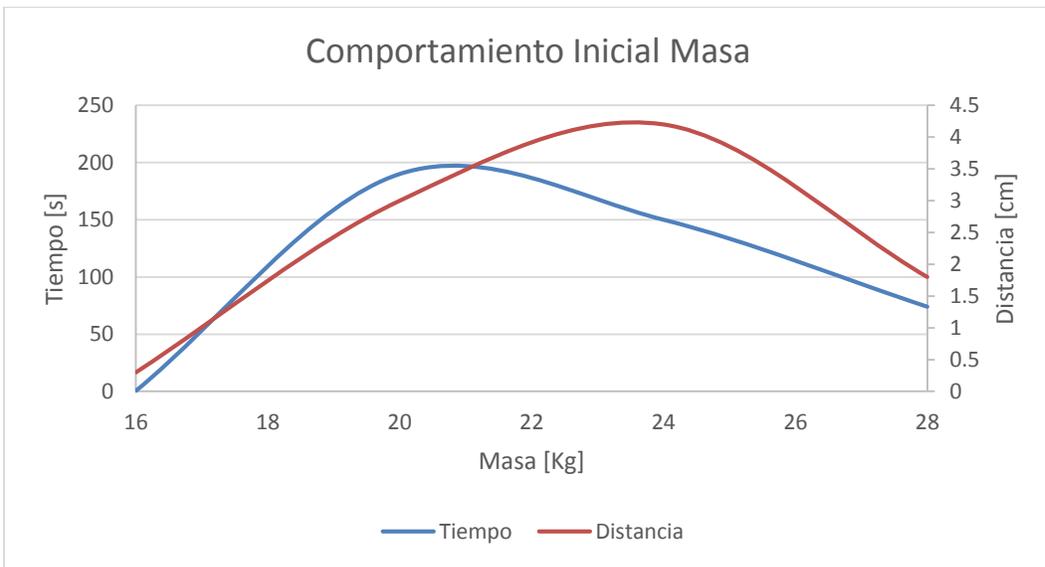


Figura 3.20 Comportamiento de masa-Cjto. Exp. 1

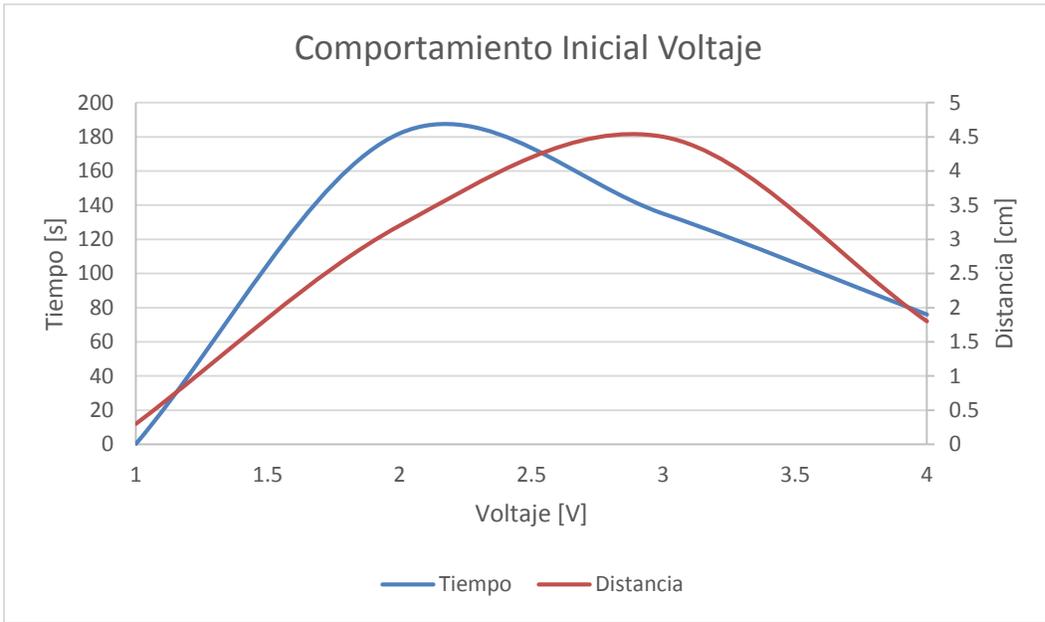


Figura 3.21 Comportamiento de voltaje-Cjto. Exp. 2

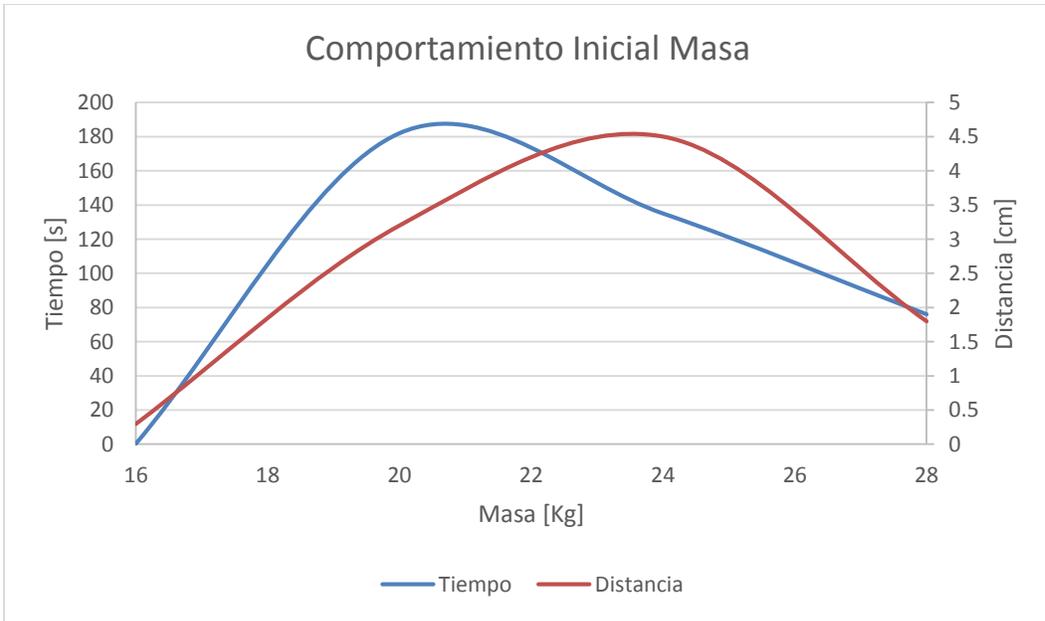


Figura 3.22 Comportamiento de masa-Cjto. Exp. 2

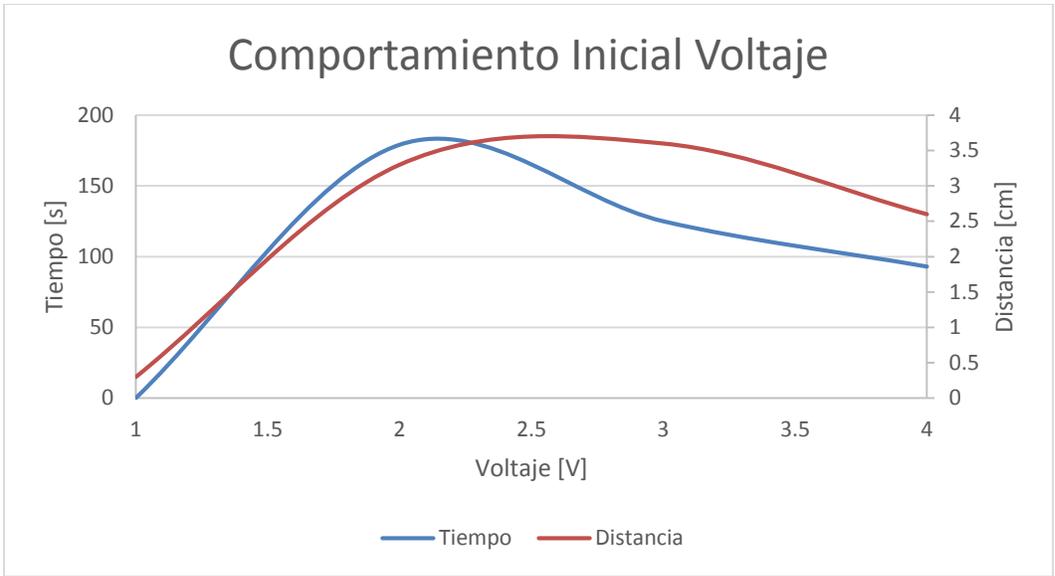


Figura 3.23 Comportamiento de voltaje-Cjto. Exp. 3

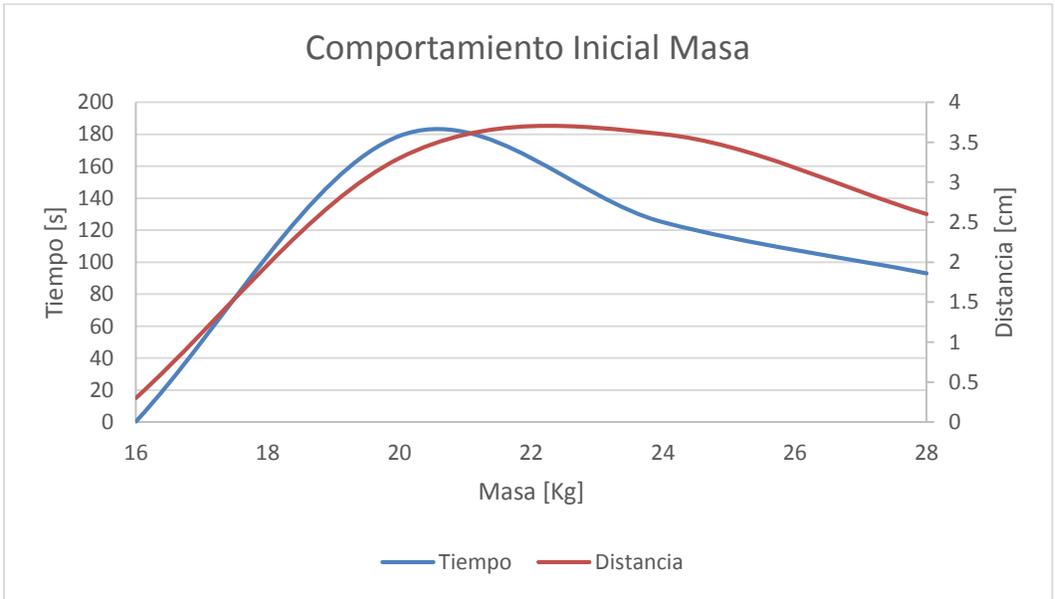


Figura 3.24 Comportamiento de masa-Cjto. Exp. 3

De éstos gráficos se observa que, al ir aumentando el voltaje varían los valores de distancia y tiempo, desfasándose entre sí, pero a pesar del desfase muestran un comportamiento similar. Así también, los valores de voltaje de mayor magnitud se encuentran en 2 V y 3 V, al mostrar que los valores de la distancia desplazada y el tiempo son mayores. Posterior a éste rango, tienden a decrecer, como se observa en los gráficos de voltaje (fig. 3.19, fig. 3.21 y fig. 3.23).

En los gráficos de masa (fig. 3.20, fig. 3.22 y fig. 3.24), se observa que los valores tienden a ser lineales y descendentes a partir de 20 kg, el cual, es un indicio de que el comportamiento del amortiguador puede ser considerado como lineal.

Banco de pruebas

Dados los resultados en la prueba anterior y por cuestiones de seguridad, se diseña un nuevo banco de pruebas (fig. 3.25), que permita variar el peso que soporta el amortiguador de manera lineal.

Este banco cuenta con un equipo de soporte, conformado por barras guías que permiten que las pesas de carga no tengan riesgo de caerse y dañar a los participantes, pesas de soporte que permiten solamente desplazar el amortiguador 3.5 cm, con el fin de no dañar el amortiguador al dejarlo soportar varias pesas de carga.

La cinta métrica y el cronómetro sirven para medir la distancia recorrida por el vástago y el tiempo que tarda en llegar.

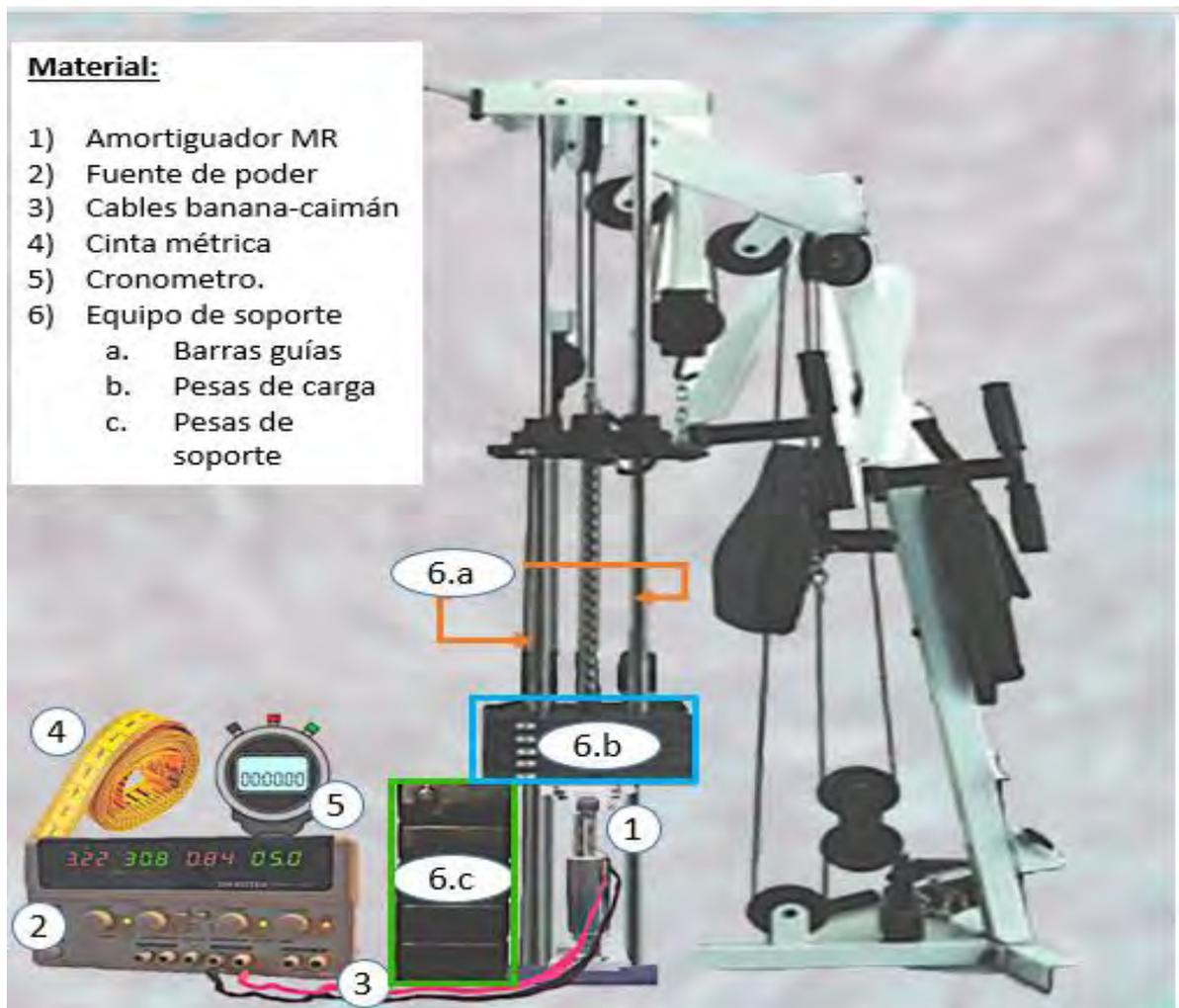


Figura 3.25 Banco de pruebas

Prueba 1

Objetivo:

Conocer en qué voltaje trabaja mejor el amortiguador, es decir, en qué voltaje se comporta lineal.

Desarrollo:

Se aplica un peso constante de 36 kg y se energizará desde 1 V hasta los 5 V, con aumentos de 1V, con el fin de observar en cuánto tiempo el vástago recorre la distancia de 3.5 cm (distancia que permite el banco de pruebas) y comprobar si se comporta lineal la relación entre el voltaje y el tiempo.

Material:

- Amortiguador MR.
- Soporte.
- Cables banana-caimán.
- Cronómetro.
- Fuente de poder.
- Banco de pesas.

Procedimiento:

- 1) Colocar el amortiguador en el soporte, manteniéndolo vertical y sin movimiento.
- 2) Energizarlo con la fuente de poder a 1V, incrementando el voltaje entre cada experimento 1 V hasta llegar a 5 V.
- 3) Colocar un peso de 36 kg (9 pesas del banco de pruebas).
- 4) Al colocar el peso, se inicia el cronómetro, con el fin de conocer el tiempo de la distancia de estabilización.
- 5) Al alcanzar la distancia de estabilización se detiene el cronómetro y se toma lectura del tiempo.
- 6) Retirar el peso que soporta el amortiguador sin desenergizarlo para poder medir la distancia de estabilización.
- 7) Desenergizarlo para que regrese a su posición original el vástago.
- 8) Repetir del paso 2 a 7.

Resultados:

Se obtienen graficando los valores de voltaje vs tiempo, con el fin de conocer un rango de voltaje para trabajar el amortiguador (los resultados de la prueba se encuentran en el capítulo 4, así como la primer tabla y gráfico).

Al no tener un tamaño de población, se determinó el tamaño de la muestra por medio de la siguiente fórmula: $n = \frac{z^2 pq}{e^2}$ (I)

Donde:

z= Nivel de confianza, el cual tendrá el valor de 1.96, ya que se desea una muestra con 95% de confianza.

p= Probabilidad de éxito, (en este caso se le asigna 0.5 al no conocer la probabilidad).

q= Probabilidad de fracaso, es igual a 1-p.

e= El error que se espera tener (en este caso es de 15% el margen de error, al ser el incremento entre un experimento y otro de 1 V, lo que facilita el estudio, por lo tanto, se le asigna e= 0.15).

Dando como resultado:

$$n = \frac{(1.96)^2(0.5)(0.5)}{(0.15)^2} = \frac{(3.84)(0.25)}{0.0225} = \frac{0.96}{0.0225} = 43$$

Por consiguiente, se realizaron 5 experimentos con 9 réplicas, donde se observó un comportamiento lineal, sin embargo, se creó que es posible obtener un mejor análisis del rango de voltajes, realizando un incremento entre cada experimento de 0.5 V y utilizando una ventana de proceso, donde el experimento inicie en 1.5 V y finalice en 4.5 V.

Al usar la ventana de proceso de 1.5 a 4.5 V, y realizar el experimento con 9 réplicas, se observó diferente comportamiento, es decir, no todos los gráficos fueron lineales y ascendentes, por lo tanto, se decide utilizar otra ventana de proceso, donde el experimento iniciará en 2 V y finalizará en 4 V.

Al usar la nueva ventana de proceso de 2 a 4 V, y realizar el experimento con 9 réplicas, se observó que tiende a variar el comportamiento del amortiguador, pero esto posiblemente fue por dejarlo energizado y con peso, lo que provocó que se calentará. Analizando los datos, se observa que la temperatura está afectando las propiedades del fluido MR. Por lo tanto, se realizará en los siguientes experimentos la medición de la temperatura. Y el paso 5, se modificará quedando de la siguiente manera:

5) Al alcanzar la distancia de estabilización se detiene el cronómetro, se toma lectura del tiempo e imagen térmica para conocer la temperatura (fig. 3.26).

Para la captura de imágenes se usó una cámara térmica con las siguientes características.

- ✓ **Proveedor:** Flir
- ✓ **Modelo:** i3
- ✓ **Especificaciones:**
 - Rango de la temperatura del objeto: -20 a +250 °C
 - Sensibilidad térmica: 0.15 °C
 - Precisión: ±2 °C de lectura



Figura 3.27
Cámara Térmica
Flir i3

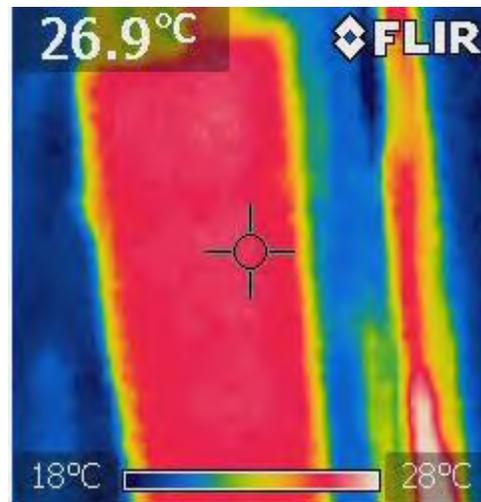


Figura 3.26.- Ejemplo de
captura de amortiguador
con cámara térmica

Después de analizar los gráficos obtenidos (fig. 5.2 y 5.3, en anexo de resultados), se decide aplicar una nueva ventana de proceso, donde el experimento inicie en 2.5 V y finalice en 3.5 V, con incrementos entre cada experimento de 0.2, al desear un análisis más detallado y al observar un comportamiento más estable en los anteriores experimentos en dicho rango.

Al seleccionar el incremento de 0.2 entre cada experimento, se tendrá que realizar 6 experimentos, por lo que se definirá de nuevo el tamaño de la muestra por medio de la fórmula:

$$n = \frac{z^2 pq}{e^2}$$

Donde:

$$z = 1.96.$$

p= 0.5.

q= 0.5.

e= 0.10 (se considera éste valor al desear más precisión en los experimentos).

Dando como resultado:

$$n = \frac{(1.96)^2(0.5)(0.5)}{(0.1)^2} = \frac{(3.84)(0.25)}{0.01} = \frac{0.96}{0.01} = 96$$

Al realizar los 6 experimentos de 2.5 a 3.5 V con 16 réplicas, se confirma y se mide el efecto de la temperatura sobre el fluido MR, por lo que es una variable que no se puede descartar al utilizar el amortiguador en esta aplicación.

De los gráficos obtenidos de la última ventana, se puede observar que el amortiguador tiende a comportarse más estable en ese rango, por lo que se determina que el voltaje de alimentación debe ser 2.9 V, al ser voltaje intermedio entre el rango seleccionado, sin embargo, al no ser tan confiable la decisión tomada, se usarán métodos estadísticos que ayuden a sustentar esa decisión. Por lo tanto, se realiza la correlación de Pearson y el cálculo de la desviación estándar para reafirmar la decisión o corregirla (resultados mostrados en el cap. 4).

Prueba 2

Objetivo:

Conocer si se comporta lineal o no el amortiguador al ir aumentando el peso de trabajo. Con el fin de conocer si se puede implementar la misma prótesis en pacientes de diferentes pesos.

Desarrollo:

Se aplica un peso de 36 kg y se energiza con 2.9 V hasta llegar a los 52 kg con un incremento de 8 kg peso entre un experimento y otro, con el fin de conocer el tiempo que tarda en llegar a la distancia que permite el banco de pruebas (3.5 cm) y así, analizar si es lineal.

Material:

- Amortiguador MR.
- Soporte.
- Cables banana-caimán.
- Cronómetro.
- Fuente de poder.

- Banco de pesas.
- Cámara térmica.

Procedimiento:

- 1) Tomar lectura con la cámara térmica de la temperatura del amortiguador antes de usarse.
- 2) Energizarlo con la fuente de poder a 2.9 V sin cargarle peso, tomar tiempo con el cronómetro hasta incrementar su temperatura alrededor de los 21 °C. Después se toma lectura de nuevo con la cámara térmica para saber la temperatura final exacta antes de iniciar los experimentos, ya que como se vio en los últimos experimentos, dejarlo energizado un tiempo sin carga, ayuda a mejorar su comportamiento.
- 3) Colocarlo en el soporte, manteniéndolo vertical y sin movimiento.
- 4) Energizarlo con la fuente de poder a 2.9 V.
- 5) Colocar un peso de 36 kg e incrementar el peso entre cada experimento 8kg hasta alcanzar 52 kg.
- 6) Al colocar el peso, se inicia el cronómetro, con el fin de conocer el tiempo de la distancia de estabilización.
- 7) Al alcanzar la distancia establecida, se detiene el cronómetro, se toma lectura del tiempo y se toma imagen térmica para conocer su temperatura.
- 8) Retirar el peso que soporta el amortiguador y desenergizarlo para que regrese a su posición original el vástago.
- 9) Repetir del paso 2 al 8.

Resultados:

Se obtiene graficando los valores de masa vs tiempo, con el fin de saber si se comporta lineal (los resultados de la prueba se encuentran en el capítulo 4, así como la primer tabla y gráfico).

Al no tener un tamaño de población, se determinó el tamaño de la muestra por medio de la

fórmula (I):
$$n = \frac{z^2 pq}{e^2}$$

Donde:

$z = 1.96.$

$p = 0.5.$

$q = 0.5.$

$e = 0.10$ (se considera éste valor al ser más pequeño el número de experimentos).

Dando como resultado:

$$n = \frac{(1.96)^2(0.5)(0.5)}{(0.1)^2} = \frac{(3.84)(0.25)}{0.01} = \frac{0.96}{0.01} = 96$$

Por consiguiente, se realizaron 3 experimentos con 32 réplicas con cada uno, donde se observó un comportamiento lineal del tiempo respecto a la masa, lo que indica, que sí se puede modelar el amortiguador como lineal. Sin embargo, la temperatura ambiente influyó en los experimentos, ya que cuando estaba frío el clima el amortiguador tardaba en calentarse más de lo normal, afectando el comportamiento lineal.



Figura 3.28 Ejemplo de prueba 2

Diseño de modelo del amortiguador

Dado los resultados de los experimentos realizados, se puede concluir que el amortiguador sí tiene un comportamiento lineal, por lo tanto, al no contar con un modelo del amortiguador se trata de obtener uno.

Para obtener el modelo se usan los datos de la prueba 2 y el método de mínimos cuadrados, ya que permite conocer la relación de las variables medidas. Y así, obtener una ecuación lineal (ecu. 3.23).

$$y = ax + b$$

3.23)

Donde: a= Pendiente de la línea.
 b= Ordenada al origen.

$$a = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \quad 3.24)$$

$$b = \frac{\sum y - a(\sum x)}{n} \quad 3.25)$$

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \cdot \sqrt{n \sum y^2 - (\sum y)^2}}; r = \text{coeficiente de correlación.} \quad 3.26)$$

Para obtener la ecuación lineal, se crea una tabla (fig. 3.29), donde se registran los datos de la prueba 2, con el fin de obtener los valores de las variables (a, b y r).

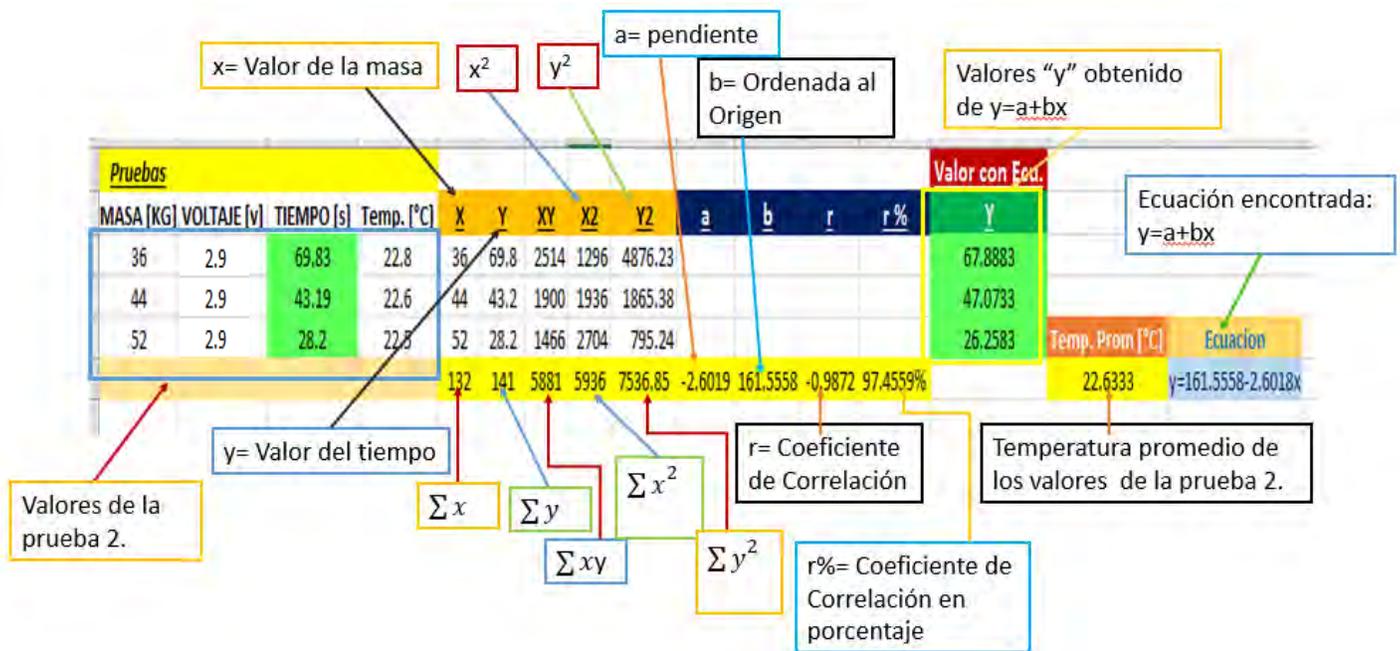


Figura 3.29 Datos de tabla para obtención de modelo para amortiguador

Los valores de las variables a, b y r, para la obtención del modelo del amortiguador se ubican en el anexo de resultados (de la tabla 5.8 a la 5.10). Sin embargo, se clasifican los datos de las tablas como se muestra en la tabla 3.3, con el objetivo de crear una nueva tabla con sólo los datos que contengan valores con una correlación del 93% como mínimo para la obtención del modelo del amortiguador MR.

Tabla 3.3 Ejemplo de tabla para modelar el amortiguador

| Correlación (r%) | Temp [°C] | Ecuación |
|------------------|-----------|-------------------|
| 93.07% | 22.8333 | y=44.4091-0.3743x |

| | | |
|--------|---------|-----------------------|
| 93.23% | 24.1667 | $y=115.2116-1.81875x$ |
| 93.29% | 24.5667 | $y=163.2233-2.62x$ |
| 93.42% | 25.3333 | $y=110.5475-1.4806x$ |

Después de observar la cantidad de datos que se tiene con una correlación de 93.07 % (tabla 5.11, anexo de resultados), se decide reagrupar los datos de la tabla, para conservar sólo los valores con 98.51% de correlación (tabla 3.4), y así, generar ecuaciones más precisas. Además, se ordenarán de menor a mayor, respecto a la temperatura (tabla 5.12, anexo de resultados).

Tabla 3.4 Ejemplo de tabla acotada para modelo del amortiguador

| Orden por temperatura---Acotación a 98.51% | | |
|--|--------------|-----------------------|
| Correlación (r%) | Temp [°C] | Ecuación |
| 100.00% | 2086.67% | $y=384.7175-6.1131x$ |
| 99.92% | 2096.67% | $y=195.3616-3.11625x$ |
| 99.43% | 2110.00% | $y=467.235-7.71875x$ |
| 98.60% | 2170.00% | $y=155.4308-2.6156x$ |
| 98.52% | 2193.33% | $y=79.2048-0.9331x$ |

Al analizar los datos de la tabla 5.12, se puede observar que aún se conservan diversos datos y al encontrar valores de temperatura que sólo cambian entre si alrededor de 0.2 °C, se decide formar nuevas ecuaciones agrupando los valores de a y b. Las condiciones para agrupar valores son que tengan valores similares de temperatura.

Por ejemplo, al extraer los primeros datos de la tabla 5.12 (tabla 3.4), se crea una nueva tabla, donde se muestra el valor de la temperatura, a y b, como se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Calculo de nuevas ecuaciones promedio

| Temp. [°C] | b | a | Nueva Ecuación |
|----------------|------------------|-----------------|---|
| 20.8667 | 384.7175 | -6.1131 | |
| 20.9667 | 195.3616 | -3.1162 | |
| 20.9167 | 290.03955 | -4.61465 | $y=290.03955-4.6146x$ |

| Temp. [°C] | b | a | Nueva Ecuación |
|----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 21.1000 | | | y=467.235-7.71875x |
| Temp. [°C] | b | a | Nueva Ecuación |
| 21.7000 | 155.4308 | -2.6156 | |
| 21.9333 | 79.2048 | -0.9331 | |
| 21.8167 | 117.3178 | -1.77435 | y=117.3178-1.7743x |

De la tabla 3.5 se ordenan los datos de menor a mayor respecto a la temperatura y se van agrupando los valores que son similares, tales como 20.8667 °C y 20.9667 °C, así como 21.7000 °C y 21.9333. Donde se obtiene el promedio de estos valores, y de la misma manera, por promedio se obtiene los valores nuevos de a y b para las nuevas ecuaciones. Las nuevas ecuaciones obtenidas se pueden observar en el anexo de resultados (tabla 5.13).

De las nuevas ecuaciones se quiere conocer la velocidad del amortiguador para poder predecir posteriormente el tiempo que tarda en llegar a una distancia predeterminada, por lo tanto, se hace uso de la fórmula de velocidad.

$$v = \frac{d}{t} \quad \text{(II)}$$

donde:

d [cm]= distancia comprimida del amortiguador.

t [s]= tiempo que tarda en llegar a la distancia comprimida.

Al requerir conocer la velocidad, se sustituye “y(t)” ecuación promedio obtenida (mostrada en tabla 28, cap. 4) en lugar de “t”.

$$v = \frac{d}{y(t)} \quad \text{(III)}$$

donde:

d [cm]= distancia comprimida del amortiguador.

y(t) [s]= ecuación promedio.

Para conocer la velocidad de las diferentes ecuaciones se creará la tabla 5.14 en el anexo de resultados, donde se registran los valores de las ecuaciones obtenidas y se deja como constante la distancia, masa y voltaje, como se muestra en el ejemplo (tabla 3.6).

Tabla 3.6 Ejemplo de modelo para obtención de velocidades

| Obtención de Velocidades | | | | | |
|--------------------------|-----------------------|-------------|----------|------------------------------------|---------------------------|
| Datos Iniciales: | | Constantes: | | <i>Distancia=3.5 (Masa (x)= 44</i> | |
| | | | | <i>[cm] [kg]</i> | |
| Temp [°C] | Ecuación Promedio | Distancia | <i>b</i> | <i>a</i> | $\frac{V=d/v(t)}{[cm/s]}$ |
| 20.6 | $y=82.3067-1.1025x$ | 3.6 | 82.3067 | 1.1025 | 0.106519276 |
| 21.816667 | $y=117.3178-1.77435x$ | 3.6 | 117.3178 | 1.77435 | 0.091728159 |
| 22.866667 | $y=89.4925-1.1893x$ | 3.6 | 89.4925 | 1.1893 | 0.096869761 |

Conociendo las ecuaciones, temperaturas, y velocidades del amortiguador, se realizará un experimento para verificar si las ecuaciones predicen el comportamiento del amortiguador, y si no encontrar unas que predigan el comportamiento.

Prueba 3

Objetivo:

Conocer el comportamiento de las nuevas ecuaciones que predicen el tiempo que tardará en llegar el vástago a una distancia predeterminada y compararla con el tiempo experimental.

Desarrollo:

Se aplica un voltaje de alimentación de 2.9 V y un peso de 44 kg, con el fin de conocer el tiempo que tarda en recorrer el vástago 1, 1.6, 2 y 2.3 cm. Para ello, se colocan nuevas pesas de soporte para que sólo recorra el vástago las distancias mencionadas anteriormente.

Material:

- Amortiguador MR.
- Soporte.
- Cables banana-caimán.
- Cronómetro.
- Fuente de poder.
- Banco de pesas.
- Cámara térmica.

Procedimiento:

- 1) Tomar lectura con la cámara térmica de la temperatura del amortiguador antes de usarse.
- 2) Energizarlo con la fuente de poder a 2.9 V sin cargarle peso, tomar tiempo con el cronómetro hasta incrementar su temperatura alrededor de los 21 °C. Después se toma lectura de nuevo con la cámara térmica para saber la temperatura final exacta antes de iniciar los experimentos.
- 3) Colocar la pesa de soporte que permite que el vástago recorra sólo la distancia de 1 cm. En los posteriores experimentos, cambiar la pesa de soporte por las de 1.6, 2 y 2.3 cm.
- 4) Colocar amortiguador en el soporte, manteniéndolo vertical y sin movimiento.
- 5) Energizarlo con la fuente de poder a 2.9 V.
- 6) Colocar un peso de 44 kg (11 pesas del banco de pruebas).
- 7) Al colocar el peso, se inicia el cronómetro, con el fin de conocer el tiempo de la distancia de estabilización.
- 8) Al alcanzar la distancia establecida, se detiene el cronómetro, se toma lectura del tiempo y se toma imagen térmica para conocer su temperatura.
- 9) Retirar el peso que soporta el amortiguador y desenergizarlo para que regrese a su posición original el vástago.
- 10) Repetir del paso 2 al 9.

Resultados:

Con los datos obtención de velocidades (tabla 5.14) se creó un macro en una hoja de cálculo, con la finalidad de obtener y llenar rápido las tablas para comparar el tiempo medido experimentalmente y el esperado a partir de las ecuaciones encontradas.

Graficando los valores de distancia vs tiempo, con un gráfico de barras, se conoce si las ecuaciones obtenidas predicen el comportamiento del amortiguador sin importar la distancia recorrida por el vástago (los resultados de la prueba se encuentran en el capítulo 4, así como la primer tabla y gráfico).

Al no tener un tamaño de población, se determinó el tamaño de la muestra por medio de la

$$\text{fórmula : } n = \frac{z^2 pq}{e^2}$$

Donde:

$$z = 1.96.$$

$$p = 0.5.$$

$q = 0.5$.

$e = 0.10$ (se considera éste valor al ser más pequeño el número de experimentos).

Dando como resultado:

$$n = \frac{(1.96)^2(0.5)(0.5)}{(0.1)^2} = \frac{(3.84)(0.25)}{0.01} = \frac{0.96}{0.01} = 96$$

Se realizaron 5 experimentos con la misma distancia establecida y después se cambió a las otras distancias. Lo que generó 20 experimentos y 5 réplicas.

Al estar realizando los experimentos se observó que las ecuaciones, tenían una diferencia de 4 segundos o más, por lo que se tuvo que hacer un ajuste en las ecuaciones para que se pudiera comparar con los tiempos experimentales. Experimentos posteriores, se observa que las ecuaciones han predecido el comportamiento del amortiguador en las diferentes distancias, pero en 1 cm, parece aún desfasados los gráficos de barras, por lo que se tendrá que realizar ciertos ajustes en las ecuaciones, además de ser los primeros experimentos, que se consideran como de calentamiento. En posteriores experimentos, se observa que se van asemejando los tiempos experimentales y los obtenidos con las ecuaciones, sin embargo, habrá que realizar más experimentos para llegar a una conclusión satisfactoria.

Al realizar más experimentos, se observa que se van perdiendo similitudes en los gráficos con temperaturas mayores a los 23 °C, la consecuencia es que la temperatura ambiente está subiendo, lo que afecta el comportamiento del amortiguador, por lo tanto, se tendrá que realizar más experimentos para verificar si las ecuaciones podrán predecir el comportamiento. También se observa que no se tiene que dejar el amortiguador energizado antes de empezar los experimentos, ya que su temperatura es de 19 °C o mayor, por lo que se puede iniciar el amortiguador sin un calentamiento previo.

Al realizar más experimentos y encontrar que se van asemejando los gráficos, se decide que se usará una ventana de proceso, donde se realice sólo experimentos con la distancia de 2.3 cm, debido a que es la distancia que permite generar el ángulo para la marcha humana.

Por lo tanto, se realizará 1 experimento con 95 réplicas de la distancia de 2.3 cm, al saber que es el tamaño mínimo de la muestra.

Después del último experimento con sus respectivas réplicas, se decidió realizar un gráfico, donde se comparó el tiempo de las ecuaciones contra el experimental, y se llegó a la conclusión que sí tienen un comportamiento similar.

Capítulo 4 Resultados

Introducción

Los resultados mostrados en este capítulo fueron seleccionados de manera estratificada, ya que se seleccionó sólo los datos más representativos, es decir, los que se observa que tienen mayor variación.

4.1) Resultados de prueba 1:

Tabla 4.1 Resultados Prueba 1

| <u>VOLTAJE [v]</u> | <u>CORRIENTE [A]</u> | <u>MASA [KG]</u> | <u>TIEMPO [s]</u> | <u>Distancia Desplazada [cm]</u> |
|----------------------------------|----------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|
| <u>Cjto. Experimentos</u> | | | | |
| 1 | 0.22 | 36 | 7.46 | 3.5 |
| 2 | 0.38 | 36 | 20.4 | 3.5 |
| 3 | 0.66 | 36 | 24.77 | 3.5 |
| 4 | 0.87 | 36 | 20.3 | 3.5 |
| 5 | 1.08 | 36 | 21.2 | 3.5 |
| <u>Réplica 1</u> | | | | |
| 1 | 0.21 | 36 | 2 | 3.5 |
| 2 | 0.4 | 36 | 27.67 | 3.5 |
| 3 | 0.66 | 36 | 32.54 | 3.5 |
| 4 | 0.84 | 36 | 34.68 | 3.5 |
| 5 | 1.07 | 36 | 41.13 | 3.5 |
| <u>Réplica 2</u> | | | | |
| 1 | 0.22 | 36 | 1.75 | 3.5 |
| 2 | 0.43 | 36 | 28.34 | 3.5 |
| 3 | 0.62 | 36 | 29.57 | 3.5 |
| 4 | 0.86 | 36 | 40.21 | 3.5 |
| 5 | 1.07 | 36 | 42.32 | 3.5 |
| <u>Réplica 3</u> | | | | |
| 1 | 0.21 | 36 | 2.74 | 3.5 |
| 2 | 0.42 | 36 | 30.43 | 3.5 |
| 3 | 0.64 | 36 | 36 | 3.5 |
| 4 | 0.84 | 36 | 38.4 | 3.5 |
| 5 | 1.04 | 36 | 39.02 | 3.5 |
| <u>Réplica 4</u> | | | | |

| | | | | |
|-------------------------|------|----|-------|-----|
| 1 | 0.22 | 36 | 1.74 | 3.5 |
| 2 | 0.42 | 36 | 31.78 | 3.5 |
| 3 | 0.64 | 36 | 34.76 | 3.5 |
| 4 | 0.84 | 36 | 39.61 | 3.5 |
| 5 | 1.02 | 36 | 42.67 | 3.5 |
| <u>Réplica 5</u> | | | | |
| 1 | 0.22 | 36 | 1.2 | 3.5 |
| 2 | 0.43 | 36 | 29.28 | 3.5 |
| 3 | 0.65 | 36 | 32.79 | 3.5 |
| 4 | 0.88 | 36 | 37.37 | 3.5 |
| 5 | 1.09 | 36 | 44.84 | 3.5 |
| <u>Réplica 6</u> | | | | |
| 1 | 0.23 | 36 | 1.35 | 3.5 |
| 2 | 0.46 | 36 | 29.6 | 3.5 |
| 3 | 0.67 | 36 | 38.88 | 3.5 |
| 4 | 0.86 | 36 | 41.92 | 3.5 |
| 5 | 1.08 | 36 | 49.84 | 3.5 |
| <u>Réplica 7</u> | | | | |
| 1 | 0.22 | 36 | 1.98 | 3.5 |
| 2 | 0.42 | 36 | 28.70 | 3.5 |
| 3 | 0.64 | 36 | 37.60 | 3.5 |
| 4 | 0.84 | 36 | 40.57 | 3.5 |
| 5 | 1.02 | 36 | 45.52 | 3.5 |
| <u>Réplica 8</u> | | | | |
| 1 | 0.23 | 36 | 2.97 | 3.5 |
| 2 | 0.43 | 36 | 27.71 | 3.5 |
| 3 | 0.65 | 36 | 35.62 | 3.5 |
| 4 | 0.88 | 36 | 37.60 | 3.5 |
| 5 | 1.09 | 36 | 43.54 | 3.5 |
| <u>Réplica 9</u> | | | | |
| 1 | 0.23 | 36 | 1.70 | 3.5 |
| 2 | 0.42 | 36 | 27.71 | 3.5 |
| 3 | 0.67 | 36 | 36.61 | 3.5 |
| 4 | 0.86 | 36 | 39.58 | 3.5 |
| 5 | 1.08 | 36 | 43.54 | 3.5 |

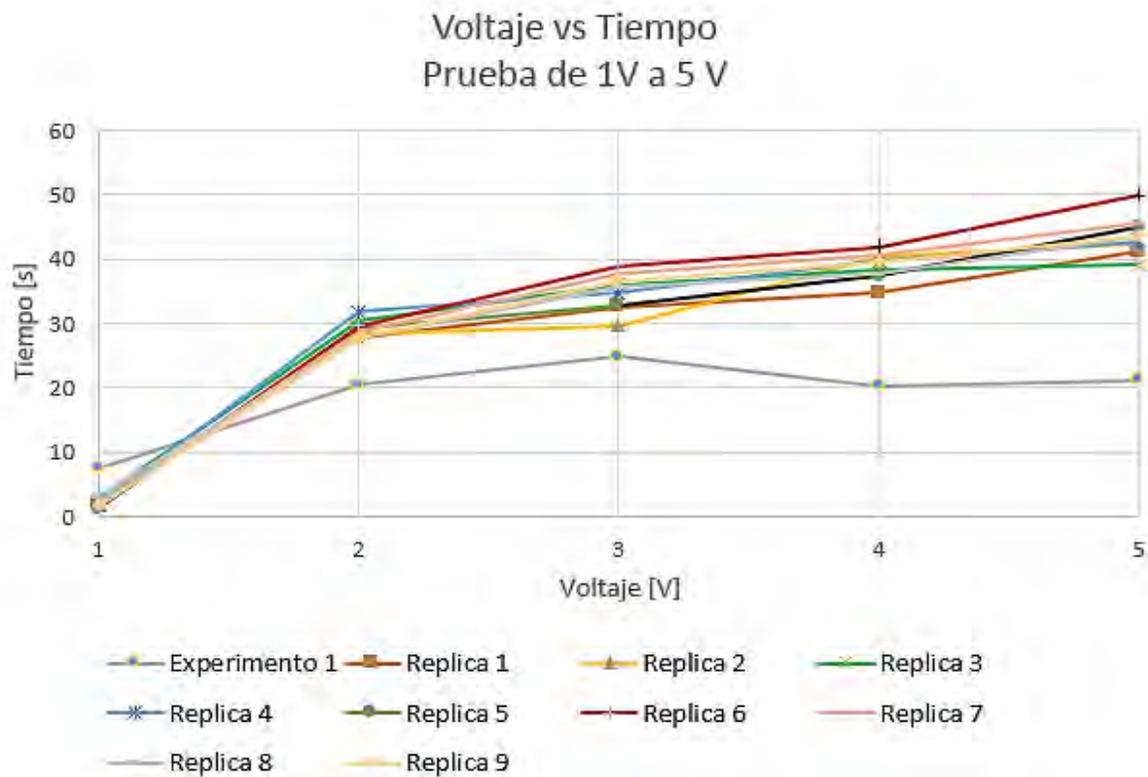


Figura 4.1 Búsqueda de Comportamiento Lineal

- De la tabla 4.1 y su gráfico (fig. 4.1), se observó que es lineal su comportamiento del tiempo de estabilización respecto al voltaje.

Analizando los gráficos, se observó que no es posible determinar en qué rango es más estable, por lo tanto, se ajustará el incremento de un experimento a otro 0.5 V y se usará una ventana de proceso, donde se inicie el experimento en 1.5 V y se termine en 4.5 V.

- De la tabla 5.1 y su gráfico (fig. 5.1), que se ubican en el anexo de resultados, se observó que ya existe variaciones, no son todos lineales ascendentes, algunas tienen comportamiento diferente, ya que como se mencionó, se dejó energizado el amortiguador y con carga antes de iniciar los experimentos, eso posiblemente causó el aumento del tiempo para llegar a la distancia de estabilización.

Otro fenómeno que se observó, es en la réplica 6 y 9, donde los tiempos aumentaron. Por lo tanto, se examinará si se repite de nuevo el fenómeno en los siguientes experimentos. También se usará una nueva ventana de proceso, donde se inicie el experimento en 2 V y se termine en 4 V, al observarse más estable y ascendentes los gráficos en éste rango.

- De la tabla 5.2 y su gráfico (fig. 5.2), se observó que, a diferencia de otros conjuntos de experimentos, éste tiene tiempos mayores a lo de sus réplicas, lo cual, es posible por el fluido, que al ser parecido el comportamiento a un fluido de Bingham, su límite elástico cambió.

También, se observó que a partir la réplica 4 en adelante los tiempos aumentaron, lo cual, puede ser porque está trabajando más tiempo el amortiguador, pero los tiempos, aunque aumentaron, son muy parecidos excepto por algunas variaciones.

Se observó también de la figura 5.2, que entre los valores de 2.5 V a 3.5 V se comportan la mayoría de los gráficos más lineal y ascendiente que en los otros voltajes, lo cual, es un indicador de qué valores son los posibles para trabajar el amortiguador y cumplir la condición de que sea lineal su control, sin embargo, se tendrá que realizar más pruebas para verificar ese comportamiento.

- De la tabla 5.3 y su gráfico (fig. 5.3), se observó lo mismo que en la tabla 5.2, en el conjunto de experimentos sus tiempos son mayores que en las réplicas, pero en este conjunto de experimentos a comparación de otros, no se dejó reposar energizado a un cierto voltaje y con un determinado peso. Lo que se realizó fue que antes de empezar la réplica 4, se desenergizó el amortiguador y se le quitó el peso, y su comportamiento fue parecido al conjunto de experimentos, el tiempo fue mayor a comparación de las réplicas.

Además, se observó en los gráficos (fig. 5.3) que las réplicas 5, 6 y 7, tienen un comportamiento no sólo lineal y ascendiente, sino que tienden a subir y bajar los gráficos en los distintos voltajes. Y examinándolos de, cuál es la parte más lineal y ascendiente, se observó que es entre los valores de 2.5 V y 3.5 V aproximadamente, por lo que se decide utilizar otra ventana de proceso, donde se inicie el experimento en 2.5 V y se termine en 3.5 V.

Debido al fenómeno de que el experimento 1 suele ser mayor que las réplicas, se le nombrará “prueba de calentamiento”, en los siguientes conjuntos de experimentos, por ser su comportamiento del amortiguador diferente.

También, se introducirá otra variable, la temperatura, la cual, se medirá para los siguientes conjuntos de experimentos, porque se observó que el tiempo se vio afectado y la posible razón es por llegar a la temperatura de Curie, lo que afectó al fluido MR, cambiando su viscosidad y provocando que el amortiguador cambiará su oposición a una fuerza.

- De la tabla 5.4 y su gráfico (fig. 5.4), se observó que al realizar un conjunto de experimentos y luego dejarlo energizado, causó que el amortiguador tuviera tiempos parecidos en las réplicas. Lo que indica que, dejarlo energizado antes de empezar otros conjuntos de experimentos es una buena prevención.

De la tabla 5.4 última columna nombrada “Temp. Amort. [°C]” y la figura 5.5 que es la relación entre el voltaje y la temperatura, se observó que la temperatura tiende a crecer lineal en los diferentes voltajes, y como van pasando los diferentes conjuntos de experimentos, la temperatura inicial aumentó conforme avanzaron los experimentos hasta llegar a un promedio de 30 °C.

Finalmente, de la prueba 1 se concluye que el amortiguador puede trabajar mejor entre el rango de 2.5 V y 3.5 V, aunque, se decide el valor de 2.9 V para trabajar las siguientes pruebas, al parecer más estable en los gráficos. Sin embargo, se decide verificar dicha selección, a través de una correlación de Pearson, la cual, dirá si el voltaje seleccionado tiene una correlación lineal. Por lo tanto, se usa la siguiente fórmula (IV):

$$r_p = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[N \sum X^2 - (\sum X)^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (IV)$$

Pero primero se establece la hipótesis nula (Ho): No hay relación entre el voltaje y el tiempo en este rango. Sin embargo, se tratará de rechazar.

Tabla 4.2 Datos correlación de Pearson-Prueba 1

| X | Y | X ² | Y ² | XY |
|--------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| 2.5 | 63.32 | 6.25 | 4009.4224 | 158.3 |
| 2.7 | 75.96 | 7.29 | 5769.9216 | 205.092 |
| 2.9 | 81.03 | 8.41 | 6565.8609 | 234.987 |
| 3.1 | 88.05 | 9.61 | 7752.8025 | 272.955 |
| 3.3 | 108.48 | 10.89 | 11767.9104 | 357.984 |
| 3.5 | 112.68 | 12.25 | 12696.7824 | 394.38 |
| ΣX= 288 | ΣY= 5906.5475 | ΣX²= 875.2 | ΣY²= 389839.2536 | ΣXY= 17979.22623 |
| (ΣX)²= 82944 | (ΣY)²= 34887304.2 | N= 96 | | |

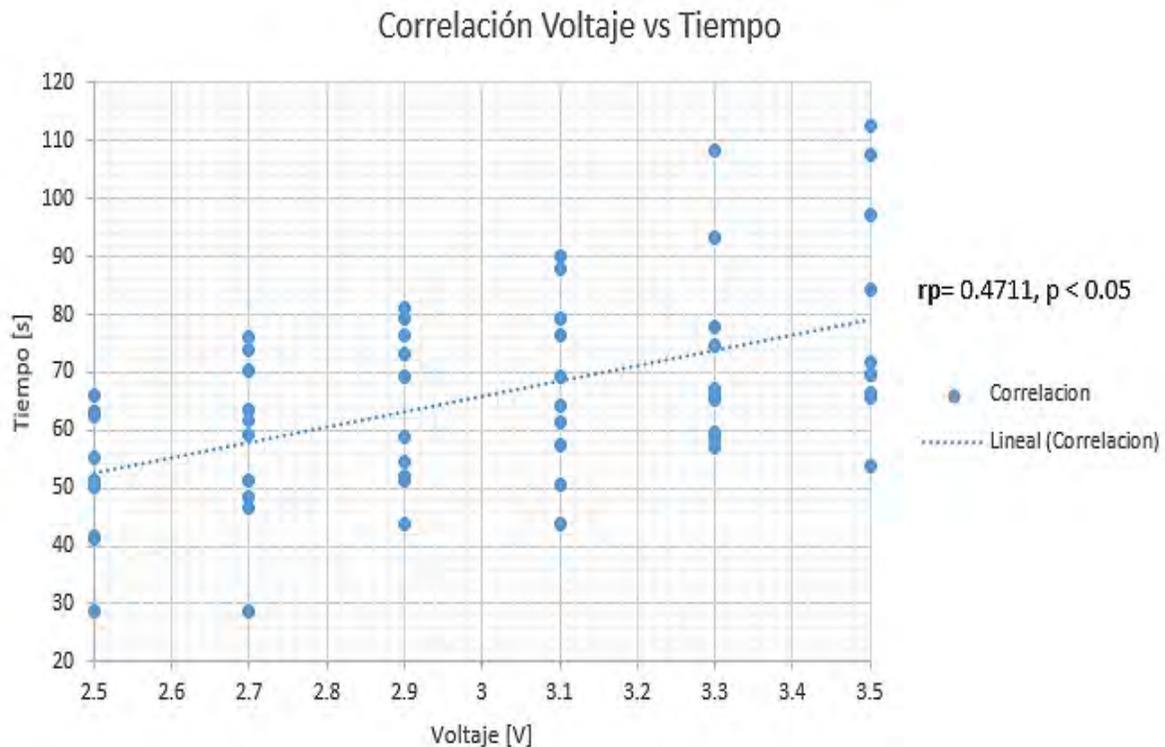


Figura 4.2 Correlación Prueba 1

Los datos y resultados de la correlación (tabla 4.2 y la figura 4.2), muestran una asociación lineal estadísticamente, entre el voltaje y el tiempo con $r_p=0.4711$ y $p<0.05$, el cual, rechaza la hipótesis nula, al comparar y ser mayor el valor r_p calculado que el de la tabla de Pearson (0.203). Estos resultados muestran una mejor correlación entre 2.5 y 3.1 V, sin embargo, no se observa adecuadamente que tanto tiende a cumplirse este rango, por lo tanto, se decide calcular la desviación estándar.

Tabla 4.3 Desviación Estándar Prueba 1

| Voltaje [V] | Tiempo Promedio [s] | S² | S | Porcentaje de Desviación [%S] |
|--------------------|----------------------------|----------------------|----------|--------------------------------------|
| 2.5 | 48.951 | 142.451 | 11.935 | 24.382 |
| 2.7 | 55.436 | 194.347 | 13.941 | 25.148 |
| 2.9 | 60.164 | 156.591 | 12.514 | 20.799 |
| 3.1 | 63.702 | 209.332 | 14.468 | 22.713 |
| 3.3 | 67.384 | 216.145 | 14.702 | 21.818 |
| 3.5 | 73.523 | 352.957 | 18.787 | 25.553 |

Con el análisis estadístico realizado, se determinará qué rango de voltaje es el indicado para trabajar el amortiguador. Por lo tanto, de la figura 4.2, se puede observar que existe mayor correlación de 2.5 a 3.1 V, pero al analizar los datos de la tabla 17, se puede observar que existe menor desviación entre el voltaje de 2.9 a 3.1 V. Por lo que se concluye, que al trabajar con 2.9 V, el amortiguador tendrá menor desviación en las mediciones y tendrá mejor correlación.

Para concluir la prueba se tomarán las siguientes medidas en las otras pruebas:

- Se energizará el amortiguador a 2.9 V.
- Se tomará el primer conjunto de experimentos como calentamiento.
- Se dejará un tiempo de calentamiento para el amortiguador, es decir, se dejará energizado un determinado tiempo (aún no se ha determinado) para llegar a los 21 °C aproximadamente y esto es para evitar tanta variación en su comportamiento.

4.2) Resultados de prueba 2:

Tabla 4.4 Resultados Prueba 2

| EXPERIMENTO-->CAMBIO DE PESO | | | | | |
|--|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|---|--------------------------------|
| <u>Pruebas</u> | | | | | |
| *Calentamiento Previo a 2.9 V-0.65 A | | | | | |
| * Temperatura inicial: 15.1 °C | | | | | |
| *Tiempo de calentamiento: 17.26 min | | | | | |
| *Temperatura final: 21.7 °C | | | | | |
| <u>Masa [Kg]</u> | <u>Voltaje [V]</u> | <u>Corriente [A]</u> | <u>Tiempo [s]</u> | <u>Distancia Desplazada [cm]</u> | <u>Temperatura [°C]</u> |
| * "Prueba de Calentamiento" | | | | | |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 230.09 | 3.5 | 21.5 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 169.94 | 3.5 | 21.8 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 35 | 3.5 | 21.8 |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 53.02 | 3.5 | 21.8 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 50.9 | 3.5 | 21.8 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 36.35 | 3.5 | 22.2 |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 42.7 | 3.5 | 22.3 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 39.3 | 3.5 | 22.4 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 37.76 | 3.5 | 22.5 |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 61.66 | 3.5 | 22.8 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 53.12 | 3.5 | 22.6 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 41.28 | 3.5 | 23.1 |

| | | | | | |
|-----------|-----|------|-------|-----|------|
| 36 | 2.9 | 0.65 | 77.15 | 3.5 | 23.1 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 44.28 | 3.5 | 23.2 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 47.46 | 3.5 | 23 |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 51.75 | 3.5 | 19.7 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 50.29 | 3.5 | 21 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 25.99 | 3.5 | 22.7 |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 67.47 | 3.5 | 21.1 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 25.03 | 3.5 | 21.9 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 28.06 | 3.5 | 22.1 |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 79.43 | 3.5 | 22.8 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 29.76 | 3.5 | 23 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 54.59 | 3.5 | 23.1 |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 84.79 | 3.5 | 23 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 50.56 | 3.5 | 23.3 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 23.7 | 3.5 | 23.3 |

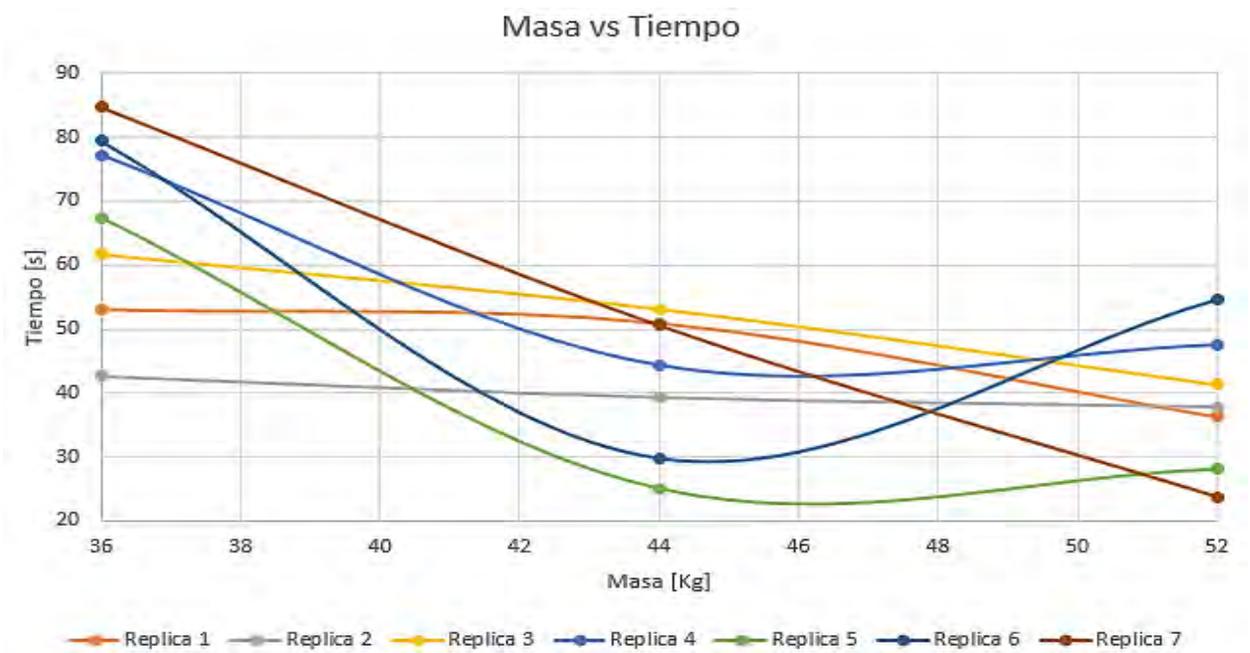


Figura 4.3 Relación Masa vs Tiempo-Tabla 18

- De la tabla 4.4 y su gráfico (fig. 4.3), se observó que se obtuvo algunos valores similares entre las réplicas, una causa pudo ser por dejarlo calentar un tiempo, que es lo concluido en la prueba 1. Sin embargo, habrá que realizar más experimentos para conocer si tendrá comportamiento lineal o será diferente, y así, poder caracterizar el amortiguador.

Otro comportamiento que se notó, es que la temperatura no tuvo un incremento considerable, sólo subió alrededor de 2 °C.

- De la tabla 5.5 y la figura 5.6, que se ubican en el anexo de resultados, se observó que los gráficos fueron similares, al estar sólo un poco desfasadas, en cuanto el tiempo de inicio del experimento, lo cual, nos muestra que es lineal su comportamiento. Y respecto a la temperatura, en la tabla se muestra que la temperatura sólo varía poco al ser menor de 2° C la variación, sin embargo, se dejó más tiempo calentar el amortiguador.
- De la tabla 5.6 y la figura 5.7, se observó que los gráficos no fueron todos lineales y estuvieron más separados entre sí en el tiempo de inicio del experimento, lo cual, pudo ser por la temperatura inicial, la cual, varía de las anteriores pruebas unos -5 °C, provocando que se comporte distinto el amortiguador.
- De la tabla 5.7 y la figura 5.8, se observó que la mayoría de los gráficos fueron lineales, sin embargo, los primeros experimentos son los que se comportan diferente.

La temperatura de iniciación fue baja y para subir la temperatura a los 21 °C se dejó pasar unos 40 min. aproximadamente, lo que fue mucho.

Finalmente, se puede concluir que el amortiguador al trabajar con los 2.9 V, es ideal para el peso de carga. Y de la prueba 2 se puede concluir que si se comporta en general lineal la relación de masa vs tiempo. Sin embargo, se debe calentar un tiempo aproximado de 30 min, con el fin de que el fluido MR tenga cierta viscosidad para que se comporte durante todo el trabajo de la misma manera. Al llegar a esta conclusión, se decide verificarla estadísticamente, con el fin de tener certeza de lo observado, y esto se realiza a través de una correlación de Pearson, la cual, dirá si la masa y tiempo tienen una correlación lineal. Por lo tanto, se usa la fórmula IV.

Tabla 4.5 Datos correlación de Pearson-Prueba 2

| X | Y | X ² | Y ² | XY |
|-----------------------------|-------------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 36 | 46.21 | 1296 | 2135.3641 | 1663.56 |
| 44 | 36.33 | 1936 | 1319.8689 | 1598.52 |
| 53 | 22.54 | 2704 | 508.0516 | 1172.08 |
| $\Sigma X=4224$ | $\Sigma Y= 3719.1$ | $\Sigma X^2= 289952$ | $\Sigma Y^2=$ 162086.601 | $\Sigma XY=$ 157649.28 |
| $(\Sigma X)^2=$ 17842176 | $(\Sigma Y)^2=$ 13831704.8 | N= 96 | | |

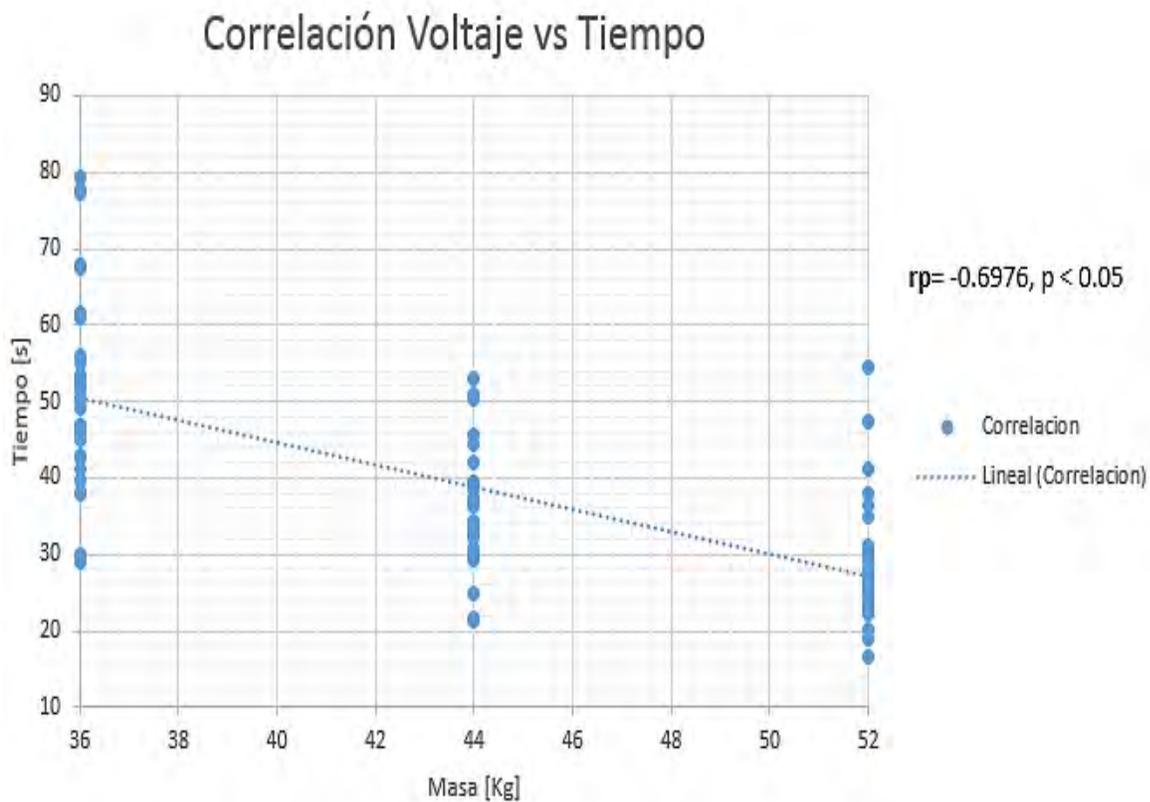


Figura 4.4 Correlación Prueba 2

Los resultados de la correlación (tabla 4.5 y la figura 4.4), muestran una asociación lineal estadísticamente, entre la masa y el tiempo con $r_p = -0.6976$ y $p < 0.05$, el cual, rechaza la hipótesis nula, al comparar y ser mayor el valor r_p calculado que el de la tabla de Pearson (0.203). Por lo tanto, con estos resultados se comprueba la correlación observada entre las variables y eso significa que sí influye el peso del paciente, pero son importar el peso el amortiguador tendrá el mismo comportamiento lineal.

4.3) Resultados de prueba 3:

Tabla 4.6 Comparación de tiempos-Prueba 3

| Rango de temperatura de trabajo : | | | 20.2-21.7 °C | | |
|-----------------------------------|----------------|------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| Temp [°C] | Distancia [cm] | Velocidad [cm/s] | Tiempo Esperado [s] | Tiempo Medido [s] | Prom. Medido [s] |
| 21.7 | 1 | 0.091728159 | 10.90177778 | 6.24 | |
| 21.7 | 1 | 0.091728159 | 10.90177778 | 6.04 | |
| 21.7 | 1 | 0.091728159 | 10.90177778 | 4.85 | |
| 21.7 | 1 | 0.091728159 | 10.90177778 | 5.05 | |
| 21.2 | 1 | 0.106519276 | 9.387972222 | 5.31 | 5.498 |
| 21.2 | 1.6 | 0.106519276 | 15.02075556 | 12.52 | |
| 20.7 | 1.6 | 0.106519276 | 15.02075556 | 8.32 | |
| 21.4 | 1.6 | 0.106519276 | 15.02075556 | 11.81 | |
| 21.5 | 1.6 | 0.091728159 | 17.44284444 | 11.47 | |
| 21.4 | 1.6 | 0.106519276 | 15.02075556 | 11.17 | 11.058 |
| 21.2 | 2 | 0.106519276 | 18.77594444 | 18.34 | |
| 21.1 | 2 | 0.106519276 | 18.77594444 | 18.24 | |
| 20.6 | 2 | 0.106519276 | 18.77594444 | 19.19 | |
| 20.4 | 2 | 0.106519276 | 18.77594444 | 17.44 | |
| 20.8 | 2 | 0.106519276 | 18.77594444 | 12.72 | 17.186 |
| 20.6 | 2.3 | 0.106519276 | 21.59233611 | 27.28 | |
| 20.6 | 2.3 | 0.106519276 | 21.59233611 | 28.11 | |
| 20.5 | 2.3 | 0.106519276 | 21.59233611 | 27.91 | |
| 20.5 | 2.3 | 0.106519276 | 21.59233611 | 25.15 | |
| 20.2 | 2.3 | 0.106519276 | 21.59233611 | 23.1 | 26.31 |

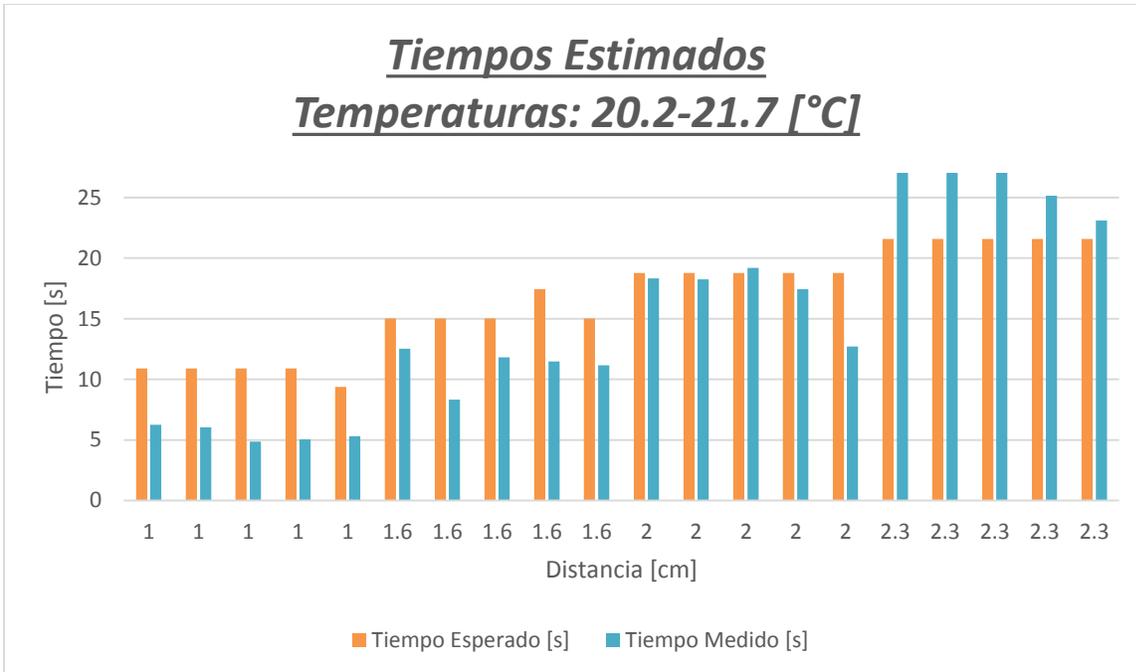


Figura 4.5 Comparación de tiempos_1

- De la tabla 4.6, se observó que la temperatura sólo aumentó 1.5 °C al realizar los experimentos. Lo que es bueno, sin embargo, una causa pudo ser que la temperatura ambiente al ser baja, enfría el amortiguador.

El gráfico (fig. 4.5), muestra que, en las distancias de 1, 1.6 y 2.3 cm, están desfasadas las barras, por lo que se tendrá que ajustar las ecuaciones posiblemente para que el tiempo esperado y medido coincidan.

- De la tabla 5.15, que se ubica en el anexo de resultados, se observó que la temperatura de trabajo fue muy baja, al trabajar con valores abajo de los 21 °C, que fue el valor mínimo predeterminado para trabajar. Y sí se dejó un tiempo de calentamiento, pero al ser la temperatura ambiente muy baja, al amortiguador no se vio afectado.

El gráfico (fig. 5.9), que se ubica en el anexo de resultados, muestra que, en las distancias de 1 cm, continúan desfasadas las barras, mientras que en las otras distancias se van asemejando los tiempos.

- De la tabla 5.16, se observó que la temperatura de trabajo fue más alta, aunque se trabajó desde 19.1 °C, al enfriarse el amortiguador de manera rápida.

El gráfico (fig. 5.10), muestra que las barras se van asemejando más, lo cual indica que se van encontrando ecuaciones para predecir el comportamiento del amortiguador.

- De la tabla 5.17, se observó que la temperatura de trabajo iba aumentando. Lo cual, va afectando la similitud entre los tiempos, ya que no se habían trabajado con temperaturas más altas.

El gráfico (fig. 5.11), muestra que son semejantes las barras, pero se van desacoplando al ir aumentando la temperatura.

- De la tabla 5.18, se observó que la temperatura de trabajo fue en un rango conocido. Sin embargo, los tiempos fueron muy diferentes. Por lo que se tendrá que ajustar las ecuaciones en ésta nueva temperatura ambiente. Además, no se calentó el amortiguador previamente al observar que la temperatura era adecuada, lo cual, se le atribuye al clima.

El gráfico (fig. 5.12), refleja lo encontrado en la tabla, que son diferentes las barras al tener condiciones iniciales diferentes. A fin de conocer el nuevo comportamiento, se decide realizar 20 experimentos más con 5 réplicas, al observar que había variaciones que no se habían tomado en cuenta.

- De la tabla 5.19, se observó que los tiempos fueron parecidos y la temperatura de trabajo se mantuvo en un rango conocido. Sin embargo, aumentó rápidamente la temperatura del amortiguador. Además, no se calentó el amortiguador previamente, porque como se ha mencionado previamente el clima era soleado.

El gráfico (fig. 5.13), refleja lo encontrado en la tabla, que son similares los tiempos, es decir, las barras tienden a variar poco entre sí, lo cual, es un buen indicador de que se está encontrando ecuaciones para modelar el amortiguador.

Para finalizar la prueba 3, se crea una ventana de proceso, donde el experimento, se enfoque solamente en la distancia de 2.3 cm, al saber que esa distancia genera un ángulo de 59° en la prótesis.

- De la tabla 5.20, se observó que los tiempos fueron más parecidos a partir de los 24.7°C y la temperatura de trabajo no aumento mucho, se mantuvo constante.

El gráfico (fig. 5.14), reflejó lo encontrado en la tabla, que son similares los tiempos, pero se asemejan más a partir del experimento 7, que corresponde a la temperatura de 24.7°C . Además, se observa que el experimento 1 y 2 tienen mayor diferencia y se pueden considerar como pruebas de calentamientos.

- De la tabla 5.21, se observó que los tiempos fueron parecidos a partir de los 22.5°C , por lo que se pudo predecir su comportamiento.

El gráfico (fig. 5.15), refleja lo encontrado en la tabla, donde los tiempos a partir del experimento 9 en adelante son más parecidos.

- De la tabla 5.22, se observó que a partir de los 22.6 °C los tiempos fueron más parecidos.

El gráfico (fig. 5.16), reflejó lo encontrado en la tabla, que son similares los tiempos a partir de la prueba 6, lo cual, ayuda a concluir que las ecuaciones encontradas, sí, predicen el comportamiento del amortiguador.

Al realizar varios experimentos y desear conocer la efectividad de las ecuaciones, se graficó los valores de las distancias de 2.3 cm, al ser la medida de importancia.

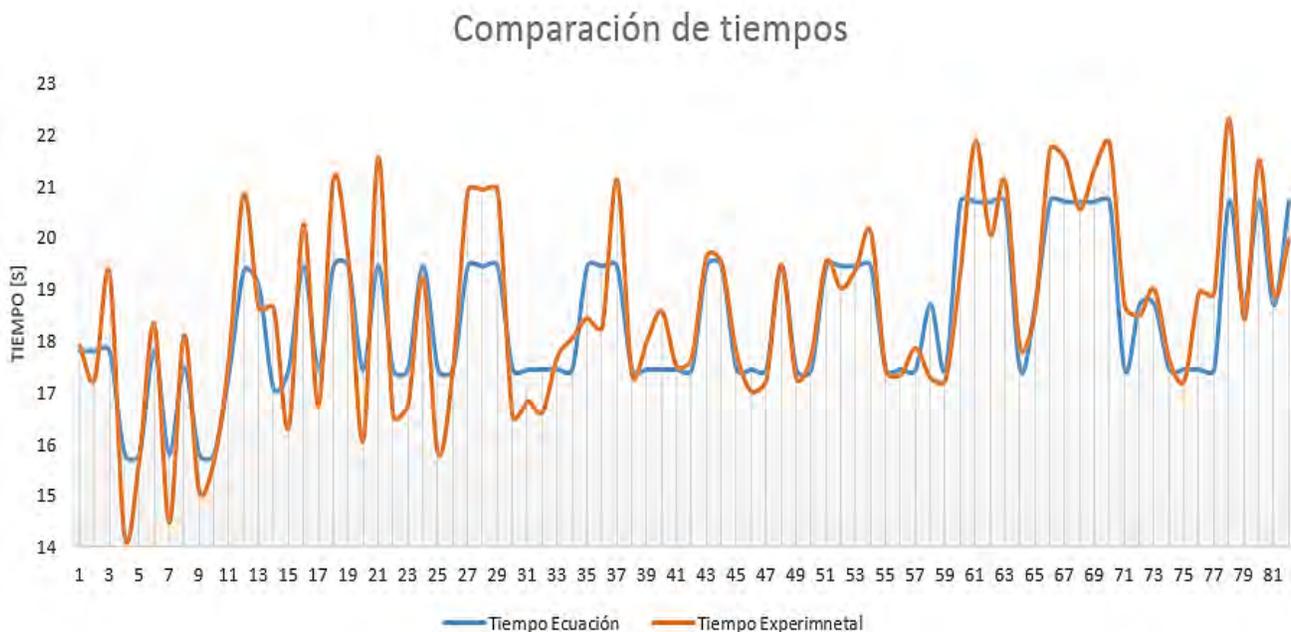


Figura 4.6 Efectividad de ecuaciones

Al graficar los valores se obtuvo la figura 4.6, la cual, excluye los valores considerados como de calentamiento. En ésta se observa que son similares los valores obtenidos con las ecuaciones y los experimentales, al variar entre uno o dos segundos el tiempo estimado en promedio.

Por lo tanto, se puede decir que las ecuaciones predicen el comportamiento en general, al tener una efectividad de 71.30 %.

Las ecuaciones que permiten predecir el comportamiento del amortiguador en temperaturas frías (aproximadamente 13°C o inferiores) se muestran en la tabla 4.7.

Tabla 4.7 Ecuaciones en climas fríos

| Temp. [°C] | Ecuaciones |
|------------|----------------------|
| 21.8166 | $y=114.775-1.7743x$ |
| 22.6333 | $y=101.0513-1.4706x$ |
| 22.8667 | $y=86.9497-1.1893x$ |
| 23.7166 | $y=108.8392-1.622x$ |

Las ecuaciones que permiten predecir el comportamiento del amortiguador en temperaturas cálidas (aproximadamente 20°C o más) se muestran en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Ecuaciones en climas cálidas

| Temp. [°C] | Ecuaciones |
|------------|---------------------|
| 22.4 | $y=88.1267-1.7743x$ |
| 22.8666 | $y=69.9844-1.1893x$ |
| 24.9 | $y=85.7109-1.6221x$ |
| 25.1 | $y=80.4352-1.4212x$ |

Discusión

Con el objetivo de ayudar a las personas que sufrieron una amputación transfemoral, se decidió caracterizar el amortiguador MR (RD-1005-3) para una prótesis semiactiva de rodilla (Nájera, Diseño de una prótesis de rodilla externa para amputado transfemoral, 2007), el cual, ayudará a recuperar la marcha humana.

Para caracterizarlo, se realizó un número de pruebas, de las cuales se obtuvo la siguiente información:

- Prueba preliminar: Se realizó con el fin de conocer el comportamiento del amortiguador, donde se llegó a la conclusión que, el amortiguador tiene un comportamiento lineal, observando la relación que tiene el voltaje vs tiempo y masa vs tiempo.
- Prueba uno: Con el objeto de conocer en qué rango de voltaje se comporta lineal el amortiguador, concluyendo que, el rango más estable era entre 2.7 V a 3.1, siendo el ideal 2.9 V para las siguientes pruebas.
Así mismo, se observó que la temperatura podría tener ciertos efectos en el amortiguador, al afectar la viscosidad del fluido.

- Prueba dos: Con el propósito de conocer el comportamiento lineal del amortiguador aumentando el peso, se observó que el peso no tenía efecto, el amortiguador siempre se comportó lineal.
- Con las pruebas antes mencionadas se concluye que el amortiguador sí se puede caracterizar como lineal, sin embargo, no se tienen ecuaciones que permitan predecir su comportamiento, por lo tanto, con los datos recopilados de la prueba dos, se realizaron ecuaciones que permiten caracterizarlo.
- Prueba tres: A efecto de verificar las ecuaciones realizadas, se diseña esta prueba, la cual, predice el tiempo en que el amortiguador llega a una distancia predeterminada.

Finalmente, con las ecuaciones encontradas se puede caracterizar el amortiguador, sin embargo, estas dependen de la temperatura ambiente. Cuando el clima es frío, se requiere calentamiento previo de 30 min aproximadamente, pudiendo éste variar, dependiendo de la temperatura. Por lo que se deberá de censar constantemente. Detectando que deberá de trabajar de 21 °C en adelante, energizándose a 2.9 V, utilizándose las ecuaciones de la tabla 39. En temperaturas cálidas, no se requiere calentamiento previo, se trabaja de 21 °C en adelante, energizándose a 2.9 V, recurriendo a las ecuaciones de la tabla 40.

Conclusión

Dado los resultados obtenidos, el objetivo del presente trabajo se cumplió al 100 %, el cual era comprender el comportamiento del amortiguador, diseñar pruebas para caracterizarlo e instrumentar un banco de pruebas.

Para tal caso se diseñaron pruebas para caracterizarlo, sin embargo, al no tener información sobre el comportamiento, se realizó una prueba preliminar para conocer las variables que intervenían en la caracterización, como el: voltaje, corriente, distancia y peso. Posteriormente, se fueron diseñando más pruebas, para conocer más a fondo la intervención de las variables, y así modelarlo, al observar que intervenían más variables de lo esperado se fueron modificando o agregando pruebas. Esto mismo sucedió al instrumentar el banco de pruebas, al no conocer qué variables intervenían en el amortiguador, se tuvo que ir agregando instrumentos de medición como el: cronómetro, cinta métrica, fuente de poder y cámara térmica.

A continuación, se exponen las respuestas de las preguntas realizadas en este proyecto.

- ¿Es viable obtener una prótesis semiactiva utilizando un amortiguador magneteoreológico?
Sí, es viable utilizar un amortiguador MR para implementarlo en una prótesis, debido a sus características de cambiar la posición del vástago al estar energizado o no. Lo que genera que el mecanismo produzca ángulos de la marcha humana. Sin embargo, falta desarrollar más investigación sobre él, los modelos que se suelen diseñar son complejos y no se tiene evidencia de que si se cumplen de manera práctica. Y en este trabajo, se planteó la manera de modelarlo de manera más fácil, es decir de manera lineal, además, se realizaron experimentos para sustentarlo.
- ¿Se puede determinar una ecuación para caracterizar el amortiguador?
Una sola ecuación suele ser difícil que caracterice al amortiguador, debido a los efectos de la temperatura, pero un conjunto de ecuaciones sí pueden caracterizarlo. Y con las ecuaciones encontradas se podrá soportar el peso de 50 kg aproximadamente y generar una velocidad en la prótesis de $0.80 \left[\frac{km}{h} \right]$ o $13.33 \left[\frac{m}{min} \right]$, lo cual se encuentra en el rango de condiciones de uso de la prótesis.
- ¿El amortiguador seleccionado es posible implementarlo en la prótesis policéntrica?
Sí, es posible implementarlo en la prótesis, sin embargo, la velocidad no se podrá variar aún.

- ¿Cuáles son las variables que influyen durante el control del amortiguador?
Las variables que influyen durante el control es el voltaje, peso y temperatura. Aunque, el voltaje y peso se pueden tomar como constantes, sin embargo, la temperatura, es una variable que suele cambiar constantemente.

Considero que, para poder realizar este trabajo, la carrera me fue de ayuda, pero en especial las materias de ciencias básicas, principios de termodinámica, electricidad y magnetismo, probabilidad y estadística y control. Ya que dichas materias me permitieron entender los fenómenos físicos y que tanta fiabilidad tenían los resultados obtenidos. Ya que se trataba de comprender experimentalmente que sucedía con el amortiguador.

Trabajos futuros

Finalmente, y en caso de una futura continuidad de este trabajo, se recomienda implementar un circuito para controlar los pulsos eléctricos; buscar la manera de cargar más peso a la prótesis, así como el uso de otro banco de pruebas más completo para realizar pruebas con mayor carga; se sugiere el diseño de un control de enfriamiento, en caso de que supere los 25.9 °C; además, existe la oportunidad de investigar otros amortiguadores para compararlos con el actual, con la finalidad de conocer si sus características permiten tener un mejor desempeño.

Anexos de resultados

Anexo resultados de prueba 1:

Tabla 0.1: Resultados Prueba 1

| <u>VOLTAJE [v]</u> | <u>CORRIENTE [A]</u> | <u>MASA [KG]</u> | <u>TIEMPO [s]</u> | <u>Distancia Desplazada [cm]</u> |
|---|----------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|
| <u>Cito. Experimentos</u> | | | | |
| 1.5 | 0.32 | 36 | 32.28 | 3.5 |
| 2 | 0.42 | 36 | 39.84 | 3.5 |
| 2.5 | 0.52 | 36 | 45.89 | 3.5 |
| 3 | 0.67 | 36 | 49.7 | 3.5 |
| 3.5 | 0.74 | 36 | 51.64 | 3.5 |
| 4 | 0.85 | 36 | 55.57 | 3.5 |
| 4.5 | 0.93 | 36 | 58.9 | 3.5 |
| * Antes de iniciar el experimento 1 se mantuvo energizado alrededor de 5 min a un voltaje de 5V-1.06A con carga el amortiguador y eso alteró posiblemente el tiempo de estabilización respecto a los valores de la tabla 4.1. | | | | |
| <u>Réplica 1</u> | | | | |
| 1.5 | 0.32 | 36 | 33.63 | 3.5 |
| 2 | 0.42 | 36 | 44.47 | 3.5 |
| 2.5 | 0.55 | 36 | 38.27 | 3.5 |
| 3 | 0.61 | 36 | 37.26 | 3.5 |
| 3.5 | 0.72 | 36 | 40.63 | 3.5 |
| 4 | 0.84 | 36 | 42.64 | 3.5 |
| 4.5 | 0.94 | 36 | 44.74 | 3.5 |
| <u>Réplica 2</u> | | | | |
| 1.5 | 0.31 | 36 | 30.78 | 3.5 |
| 2 | 0.44 | 36 | 28.62 | 3.5 |
| 2.5 | 0.55 | 36 | 31.89 | 3.5 |
| 3 | 0.65 | 36 | 46.8 | 3.5 |
| 3.5 | 0.76 | 36 | 38.71 | 3.5 |
| 4 | 0.86 | 36 | 33.58 | 3.5 |
| 4.5 | 0.91 | 36 | 33.64 | 3.5 |
| <u>Réplica 3</u> | | | | |
| 1.5 | 0.31 | 36 | 32.28 | 3.5 |
| 2 | 0.42 | 36 | 32.78 | 3.5 |
| 2.5 | 0.52 | 36 | 31.17 | 3.5 |
| 3 | 0.63 | 36 | 37.14 | 3.5 |
| 3.5 | 0.73 | 36 | 38.37 | 3.5 |

| | | | | |
|-------------------------|------|----|-------|-----|
| 4 | 0.83 | 36 | 40.66 | 3.5 |
| 4.5 | 0.92 | 36 | 41.15 | 3.5 |
| <u>Réplica 4</u> | | | | |
| 1.5 | 0.27 | 36 | 22.26 | 3.5 |
| 2 | 0.42 | 36 | 18.74 | 3.5 |
| 2.5 | 0.47 | 36 | 23.01 | 3.5 |
| 3 | 0.63 | 36 | 24.03 | 3.5 |
| 3.5 | 0.74 | 36 | 25.68 | 3.5 |
| 4 | 0.86 | 36 | 26.47 | 3.5 |
| 4.5 | 0.95 | 36 | 28.64 | 3.5 |
| <u>Réplica 5</u> | | | | |
| 1.5 | 0.33 | 36 | 21.57 | 3.5 |
| 2 | 0.44 | 36 | 26.28 | 3.5 |
| 2.5 | 0.49 | 36 | 33.96 | 3.5 |
| 3 | 0.64 | 36 | 36.86 | 3.5 |
| 3.5 | 0.75 | 36 | 37.45 | 3.5 |
| 4 | 0.84 | 36 | 35.64 | 3.5 |
| 4.5 | 0.95 | 36 | 27.81 | 3.5 |
| <u>Réplica 6</u> | | | | |
| 1.5 | 0.28 | 36 | 31.23 | 3.5 |
| 2 | 0.41 | 36 | 35.16 | 3.5 |
| 2.5 | 0.5 | 36 | 39.65 | 3.5 |
| 3 | 0.61 | 36 | 42.56 | 3.5 |
| 3.5 | 0.74 | 36 | 73.03 | 3.5 |
| 4 | 0.84 | 36 | 81.47 | 3.5 |
| 4.5 | 0.94 | 36 | 90.13 | 3.5 |
| <u>Réplica 7</u> | | | | |
| 1.5 | 0.34 | 36 | 31.94 | 3.5 |
| 2 | 0.43 | 36 | 33.61 | 3.5 |
| 2.5 | 0.55 | 36 | 36.1 | 3.5 |
| 3 | 0.64 | 36 | 42.76 | 3.5 |
| 3.5 | 0.73 | 36 | 46.83 | 3.5 |
| 4 | 0.83 | 36 | 51.8 | 3.5 |
| 4.5 | 0.94 | 36 | 61.26 | 3.5 |
| <u>Réplica 8</u> | | | | |
| 1.5 | 0.33 | 36 | 29.49 | 3.5 |
| 2 | 0.42 | 36 | 31.63 | 3.5 |
| 2.5 | 0.53 | 36 | 38.42 | 3.5 |
| 3 | 0.64 | 36 | 58.48 | 3.5 |
| 3.5 | 0.75 | 36 | 54.55 | 3.5 |
| 4 | 0.83 | 36 | 60.62 | 3.5 |
| 4.5 | 0.95 | 36 | 58.16 | 3.5 |
| <u>Réplica 9</u> | | | | |

| | | | | |
|-----|------|----|-------|-----|
| 1.5 | 0.31 | 36 | 31.02 | 3.5 |
| 2 | 0.41 | 36 | 36.49 | 3.5 |
| 2.5 | 0.49 | 36 | 54.47 | 3.5 |
| 3 | 0.63 | 36 | 54.38 | 3.5 |
| 3.5 | 0.71 | 36 | 58.85 | 3.5 |
| 4 | 0.83 | 36 | 71.14 | 3.5 |
| 4.5 | 0.92 | 36 | 94.61 | 3.5 |

Voltaje vs Tiempo
Prueba de 1.5 V a 4.5 V

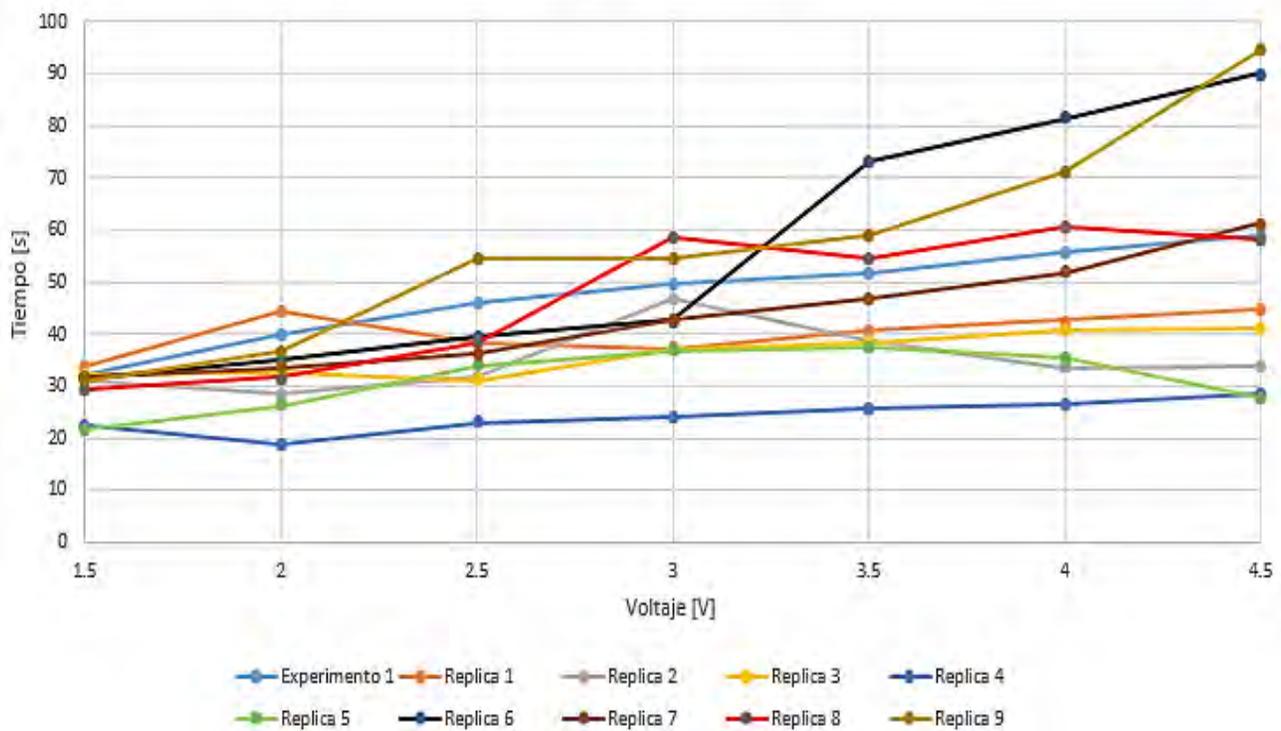


Figura 0.1 Comportamiento del amortiguador-Tabla 5.1

Tabla 0.2 Resultados Prueba 1

| VOLTAJE [v] | CORRIENTE [A] | MASA [KG] | TIEMPO [s] | Distancia Desplazada [cm] |
|----------------------------------|---------------|-----------|------------|---------------------------|
| <u>Cjto. Experimentos</u> | | | | |
| 2 | 0.43 | 36 | 54.56 | 3.5 |
| 2.5 | 0.56 | 36 | 20.33 | 3.5 |
| 3 | 0.67 | 36 | 30.8 | 3.5 |
| 3.5 | 0.77 | 36 | 33.6 | 3.5 |

| | | | | |
|---|------|----|-------|-----|
| 4 | 0.9 | 36 | 43.78 | 3.5 |
| <u>Réplica 1</u> | | | | |
| 2 | 0.46 | 36 | 29.04 | 3.5 |
| 2.5 | 0.57 | 36 | 36.78 | 3.5 |
| 3 | 0.67 | 36 | 39.71 | 3.5 |
| 3.5 | 0.77 | 36 | 40.55 | 3.5 |
| 4 | 0.88 | 36 | 47.59 | 3.5 |
| <u>Réplica 2</u> | | | | |
| 2 | 0.46 | 36 | 36.5 | 3.5 |
| 2.5 | 0.54 | 36 | 37.75 | 3.5 |
| 3 | 0.66 | 36 | 42.52 | 3.5 |
| 3.5 | 0.76 | 36 | 43.9 | 3.5 |
| 4 | 0.87 | 36 | 44.6 | 3.5 |
| <u>Réplica 3</u> | | | | |
| 2 | 0.44 | 36 | 25.91 | 3.5 |
| 2.5 | 0.55 | 36 | 31.31 | 3.5 |
| 3 | 0.68 | 36 | 29.46 | 3.5 |
| 3.5 | 0.75 | 36 | 32.11 | 3.5 |
| 4 | 0.89 | 36 | 39.17 | 3.5 |
| *Antes de iniciar la réplica_4 se mantuvo energizado alrededor de 12 min a un voltaje de 4V-0.87A con la carga constante y eso alteró posiblemente el tiempo de recorrido del vástago en las siguientes réplicas. La razón de dejarlo energizado es observar si afecta los tiempos. | | | | |
| <u>Réplica 4</u> | | | | |
| 2 | 0.45 | 36 | 27.97 | 3.5 |
| 2.5 | 0.54 | 36 | 40.67 | 3.5 |
| 3 | 0.61 | 36 | 59.47 | 3.5 |
| 3.5 | 0.74 | 36 | 97.32 | 3.5 |
| 4 | 0.84 | 36 | 86.29 | 3.5 |
| <u>Réplica 5</u> | | | | |
| 2 | 0.42 | 36 | 37.33 | 3.5 |
| 2.5 | 0.55 | 36 | 57.25 | 3.5 |
| 3 | 0.65 | 36 | 54.24 | 3.5 |
| 3.5 | 0.73 | 36 | 58.93 | 3.5 |
| 4 | 0.84 | 36 | 84.07 | 3.5 |
| <u>Réplica 6</u> | | | | |
| 2 | 0.4 | 36 | 41.5 | 3.5 |
| 2.5 | 0.51 | 36 | 71.63 | 3.5 |
| 3 | 0.64 | 36 | 90.13 | 3.5 |
| 3.5 | 0.75 | 36 | 72.05 | 3.5 |
| 4 | 0.85 | 36 | 72.6 | 3.5 |
| <u>Réplica 7</u> | | | | |
| 2 | 0.43 | 36 | 43.73 | 3.5 |
| 2.5 | 0.5 | 36 | 49.83 | 3.5 |

| | | | | |
|---|------|----|--------|-----|
| 3 | 0.64 | 36 | 57.74 | 3.5 |
| 3.5 | 0.67 | 36 | 59.84 | 3.5 |
| 4 | 0.86 | 36 | 70.42 | 3.5 |
| *Se desenergizó el amortiguador y se le quito el peso por alrededor de 12 min para dejarlo reposar. Y empezar la réplica 8. | | | | |
| <u>Réplica 8</u> | | | | |
| 2 | 0.44 | 36 | 39.33 | 3.5 |
| 2.5 | 0.54 | 36 | 77.87 | 3.5 |
| 3 | 0.66 | 36 | 108.15 | 3.5 |
| 3.5 | 0.76 | 36 | 118.69 | 3.5 |
| 4 | 0.87 | 36 | 81.67 | 3.5 |
| <u>Réplica 9</u> | | | | |
| 2 | 0.44 | 36 | 47.61 | 3.5 |
| 2.5 | 0.54 | 36 | 45.54 | 3.5 |
| 3 | 0.66 | 36 | 70.8 | 3.5 |
| 3.5 | 0.76 | 36 | 76.9 | 3.5 |
| 4 | 0.9 | 36 | 181.69 | 3.5 |

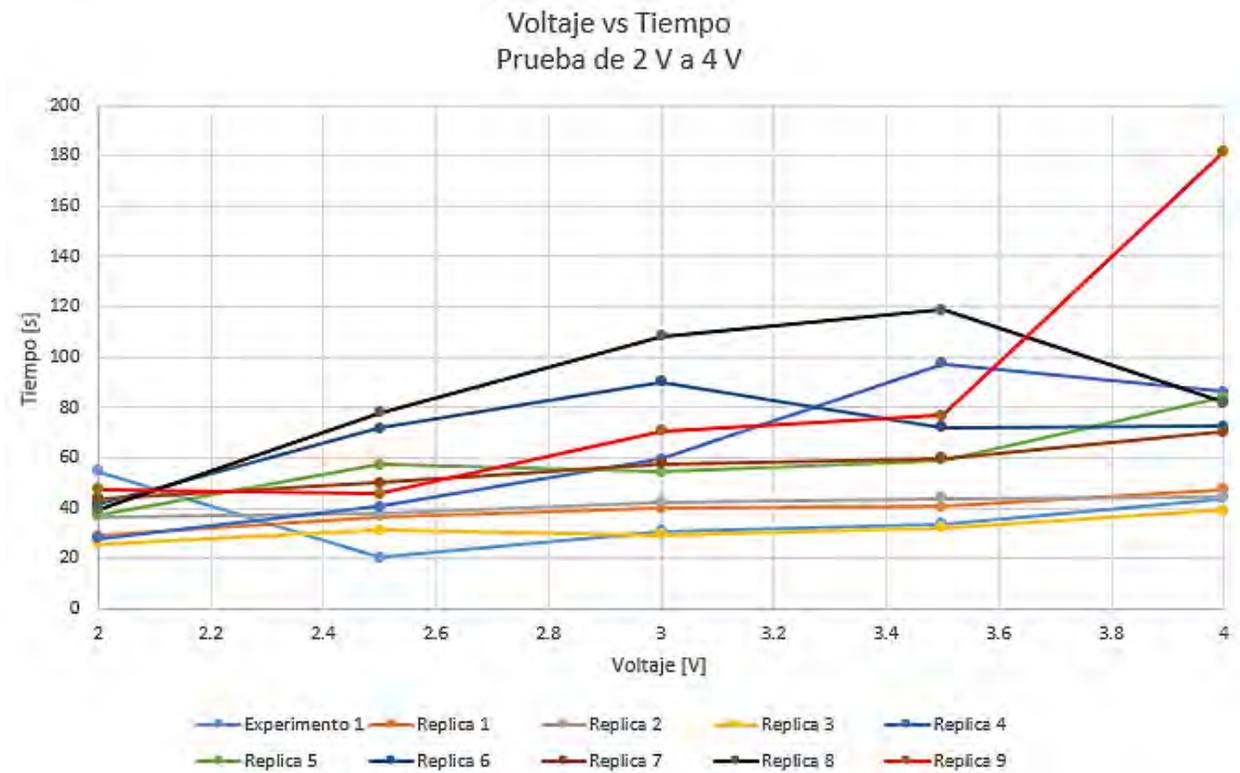


Figura 0.2 Comportamiento del amortiguador-Tabla 5.2

Tabla 0.3 Resultados Prueba 1

| <u>VOLTAJE [v]</u> | <u>CORRIENTE [A]</u> | <u>MASA [KG]</u> | <u>TIEMPO [s]</u> | <u>Distancia Desplazada [cm]</u> |
|----------------------------|----------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|
| <u>Cjto.</u> | | | | |
| <u>Experimentos</u> | | | | |
| 2 | 0.42 | 36 | 47.85 | 3.5 |
| 2.5 | 0.54 | 36 | 32.75 | 3.5 |
| 3 | 0.67 | 36 | 38.14 | 3.5 |
| 3.5 | 0.77 | 36 | 38.3 | 3.5 |
| 4 | 0.87 | 36 | 39.11 | 3.5 |
| <u>Réplica 1</u> | | | | |
| 2 | 0.42 | 36 | 25.57 | 3.5 |
| 2.5 | 0.55 | 36 | 31.34 | 3.5 |
| 3 | 0.67 | 36 | 37.81 | 3.5 |
| 3.5 | 0.78 | 36 | 40.92 | 3.5 |
| 4 | 0.85 | 36 | 46.58 | 3.5 |
| <u>Réplica 2</u> | | | | |
| 2 | 0.45 | 36 | 30.93 | 3.5 |
| 2.5 | 0.56 | 36 | 34.22 | 3.5 |
| 3 | 0.67 | 36 | 38.21 | 3.5 |
| 3.5 | 0.77 | 36 | 60.43 | 3.5 |
| 4 | 0.88 | 36 | 77.35 | 3.5 |
| <u>Réplica 3</u> | | | | |
| 2 | 0.44 | 36 | 28.55 | 3.5 |
| 2.5 | 0.55 | 36 | 67.16 | 3.5 |
| 3 | 0.65 | 36 | 56.18 | 3.5 |
| 3.5 | 0.77 | 36 | 61.14 | 3.5 |
| 4 | 0.83 | 36 | 61.81 | 3.5 |
| <u>Réplica 4</u> | | | | |
| 2 | 0.41 | 36 | 54.71 | 3.5 |
| 2.5 | 0.52 | 36 | 66.11 | 3.5 |
| 3 | 0.63 | 36 | 74.84 | 3.5 |
| 3.5 | 0.72 | 36 | 93.41 | 3.5 |
| 4 | 0.85 | 36 | 76.35 | 3.5 |
| <u>Réplica 5</u> | | | | |
| 2 | 0.42 | 36 | 38.31 | 3.5 |
| 2.5 | 0.49 | 36 | 72.36 | 3.5 |
| 3 | 0.66 | 36 | 43.59 | 3.5 |
| 3.5 | 0.75 | 36 | 82.18 | 3.5 |

| | | | | |
|-------------------------|------|----|--------|-----|
| 4 | 0.83 | 36 | 50.99 | 3.5 |
| <u>Réplica 6</u> | | | | |
| 2 | 0.41 | 36 | 35.84 | 3.5 |
| 2.5 | 0.52 | 36 | 67.78 | 3.5 |
| 3 | 0.63 | 36 | 67.66 | 3.5 |
| 3.5 | 0.69 | 36 | 81.17 | 3.5 |
| 4 | 0.84 | 36 | 87.41 | 3.5 |
| <u>Réplica 7</u> | | | | |
| 2 | 0.41 | 36 | 63.04 | 3.5 |
| 2.5 | 0.54 | 36 | 50.3 | 3.5 |
| 3 | 0.56 | 36 | 58.66 | 3.5 |
| 3.5 | 0.75 | 36 | 84.35 | 3.5 |
| 4 | 0.78 | 36 | 88.46 | 3.5 |
| <u>Réplica 8</u> | | | | |
| 2 | 0.41 | 36 | 38.883 | 3.5 |
| 2.5 | 0.54 | 36 | 65.802 | 3.5 |
| 3 | 0.57 | 36 | 66.799 | 3.5 |
| 3.5 | 0.75 | 36 | 70.787 | 3.5 |
| 4 | 0.77 | 36 | 87.736 | 3.5 |
| <u>Réplica 9</u> | | | | |
| 2 | 0.42 | 36 | 33.898 | 3.5 |
| 2.5 | 0.54 | 36 | 49.85 | 3.5 |
| 3 | 0.57 | 36 | 76.769 | 3.5 |
| 3.5 | 0.75 | 36 | 74.775 | 3.5 |
| 4 | 0.78 | 36 | 84.745 | 3.5 |

Voltaje vs Tiempo
Prueba de 2 V a 4 V

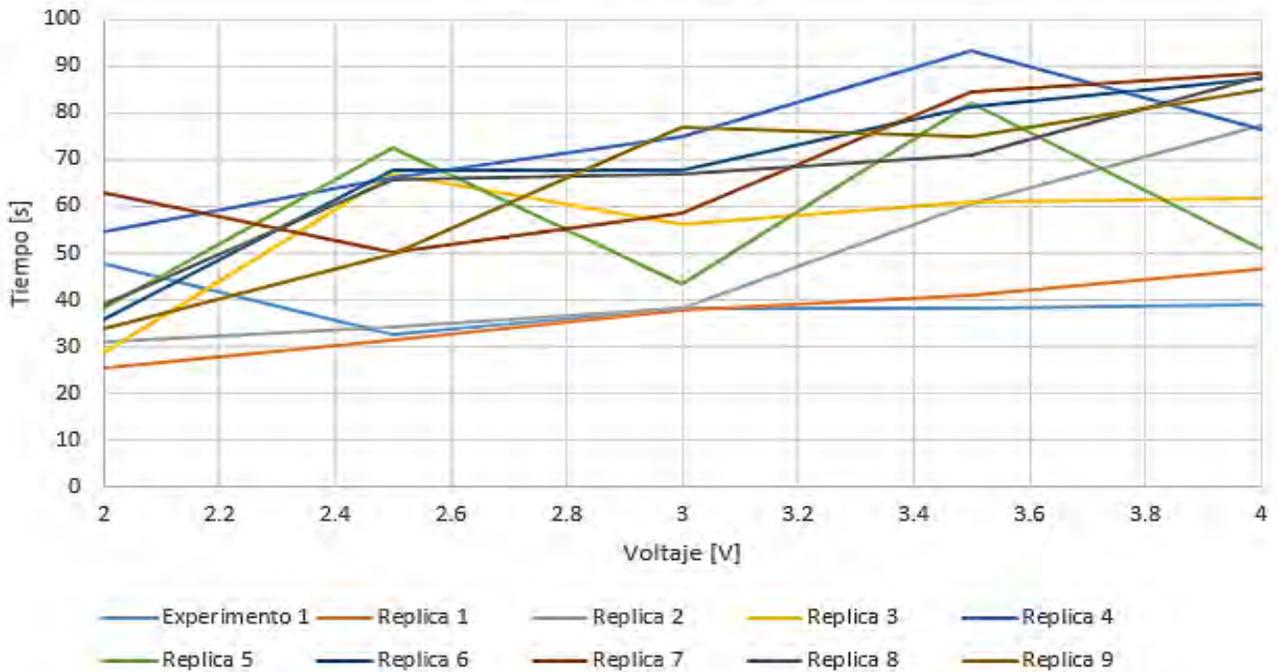


Figura 0.3 Comportamiento del amortiguador-Tabla 5.3

Tabla 0.4 Resultados Prueba. 1

| <u>VOLTAJE [v]</u> | <u>CORRIENTE [A]</u> | <u>MASA [KG]</u> | <u>TIEMPO [s]</u> | <u>Distancia Desplazada [cm]</u> | <u>Temp. Amort. [°C]</u> |
|---|----------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|--------------------------|
| * Prueba de "Calentamiento" | | | | | |
| <u>Cito. Experimentos</u> | | | | | |
| 2.5 | 0.54 | 36 | 28.68 | 3.5 | 21.3 |
| 2.7 | 0.48 | 36 | 28.75 | 3.5 | 21.5 |
| 2.9 | 0.64 | 36 | 43.83 | 3.5 | 21.8 |
| 3.1 | 0.7 | 36 | 50.45 | 3.5 | 22.5 |
| 3.3 | 0.74 | 36 | 57.05 | 3.5 | 23.2 |
| 3.5 | 0.79 | 36 | 65.71 | 3.5 | 23.5 |
| * Se dejó energizado con 2.5V y con carga cte. alrededor de 10 min. | | | | | |
| <u>Réplica 1</u> | | | | | |
| 2.5 | 0.49 | 36 | 41.37 | 3.5 | 23.8 |
| 2.7 | 0.58 | 36 | 46.72 | 3.5 | 24.3 |
| 2.9 | 0.63 | 36 | 51.4 | 3.5 | 24.6 |
| 3.1 | 0.6 | 36 | 43.65 | 3.5 | 25.2 |

| | | | | | |
|-------------------------|------|----|--------|-----|-------|
| 3.3 | 0.74 | 36 | 58.46 | 3.5 | 25.4 |
| 3.5 | 0.77 | 36 | 53.88 | 3.5 | 26 |
| <u>Réplica 2</u> | | | | | |
| 2.5 | 0.56 | 36 | 41.71 | 3.5 | 26 |
| 2.7 | 0.61 | 36 | 48.31 | 3.5 | 26.4 |
| 2.9 | 0.65 | 36 | 52.11 | 3.5 | 26.7 |
| 3.1 | 0.67 | 36 | 57.48 | 3.5 | 26.7 |
| 3.3 | 0.73 | 36 | 59.54 | 3.5 | 27.2 |
| 3.5 | 0.78 | 36 | 66.38 | 3.5 | 27.5 |
| <u>Réplica 3</u> | | | | | |
| 2.5 | 0.55 | 36 | 63.32 | 3.5 | 27.7 |
| 2.7 | 0.6 | 36 | 73.8 | 3.5 | 27.9 |
| 2.9 | 0.61 | 36 | 69.08 | 3.5 | 27.9 |
| 3.1 | 0.66 | 36 | 69.24 | 3.5 | 28 |
| 3.3 | 0.71 | 36 | 74.65 | 3.5 | 28.01 |
| 3.5 | 0.77 | 36 | 97.11 | 3.5 | 28.8 |
| <u>Réplica 4</u> | | | | | |
| 2.5 | 0.45 | 36 | 63.32 | 3.5 | 28.8 |
| 2.7 | 0.59 | 36 | 75.96 | 3.5 | 28 |
| 2.9 | 0.6 | 36 | 81.03 | 3.5 | 28.5 |
| 3.1 | 0.67 | 36 | 88.05 | 3.5 | 29.6 |
| 3.3 | 0.72 | 36 | 108.48 | 3.5 | 29.2 |
| 3.5 | 0.72 | 36 | 112.68 | 3.5 | 29.5 |
| <u>Réplica 5</u> | | | | | |
| 2.5 | 0.55 | 36 | 66.02 | 3.5 | 29.3 |
| 2.7 | 0.56 | 36 | 51.43 | 3.5 | 29.2 |
| 2.9 | 0.62 | 36 | 79.14 | 3.5 | 29.2 |
| 3.1 | 0.68 | 36 | 85.24 | 3.5 | 29.7 |
| 3.1 | 0.69 | 36 | 90.05 | 3.5 | 30.5 |
| 3.3 | 0.72 | 36 | 93.37 | 3.5 | 30.5 |
| 3.5 | 0.76 | 36 | 71.82 | 3.5 | 30.2 |
| <u>Réplica 6</u> | | | | | |
| 2.5 | 0.54 | 36 | 50.22 | 3.5 | 30.3 |
| 2.7 | 0.58 | 36 | 70.2 | 3.5 | 29.8 |
| 2.9 | 0.65 | 36 | 76.34 | 3.5 | 30 |
| 3.1 | 0.67 | 36 | 76.36 | 3.5 | 29.4 |
| 3.3 | 0.72 | 36 | 77.74 | 3.5 | 29.9 |
| 3.5 | 0.77 | 36 | 84.44 | 3.5 | 30.2 |
| <u>Réplica 7</u> | | | | | |
| 2.5 | 0.56 | 36 | 62.26 | 3.5 | 29.9 |
| 2.7 | 0.6 | 36 | 63.4 | 3.5 | 29.7 |
| 2.9 | 0.63 | 36 | 58.83 | 3.5 | 30 |
| 3.1 | 0.63 | 36 | 64.14 | 3.5 | 30.1 |

| | | | | | |
|-------------------------|------|----|--------|-----|------|
| 3.3 | 0.72 | 36 | 65.43 | 3.5 | 30.4 |
| 3.5 | 0.73 | 36 | 69.48 | 3.5 | 30.4 |
| <u>Réplica 8</u> | | | | | |
| 2.5 | 0.54 | 36 | 55.24 | 3.5 | 30.5 |
| 2.7 | 0.58 | 36 | 59.24 | 3.5 | 30.2 |
| 2.9 | 0.64 | 36 | 73.2 | 3.5 | 30.4 |
| 3.1 | 0.68 | 36 | 79.26 | 3.5 | 29.9 |
| 3.3 | 0.73 | 36 | 65.97 | 3.5 | 30.2 |
| 3.5 | 0.77 | 36 | 69.65 | 3.5 | 30.1 |
| <u>Réplica 9</u> | | | | | |
| 2.5 | 0.39 | 36 | 51.44 | 3.5 | 27 |
| 2.7 | 0.57 | 36 | 61.72 | 3.5 | 27.3 |
| 2.9 | 0.6 | 36 | 54.43 | 3.5 | 27.3 |
| 3.1 | 0.65 | 36 | 61.35 | 3.5 | 27.3 |
| 3.3 | 0.74 | 36 | 67.26 | 3.5 | 27.5 |
| 3.5 | 0.78 | 36 | 107.67 | 3.5 | 28.1 |

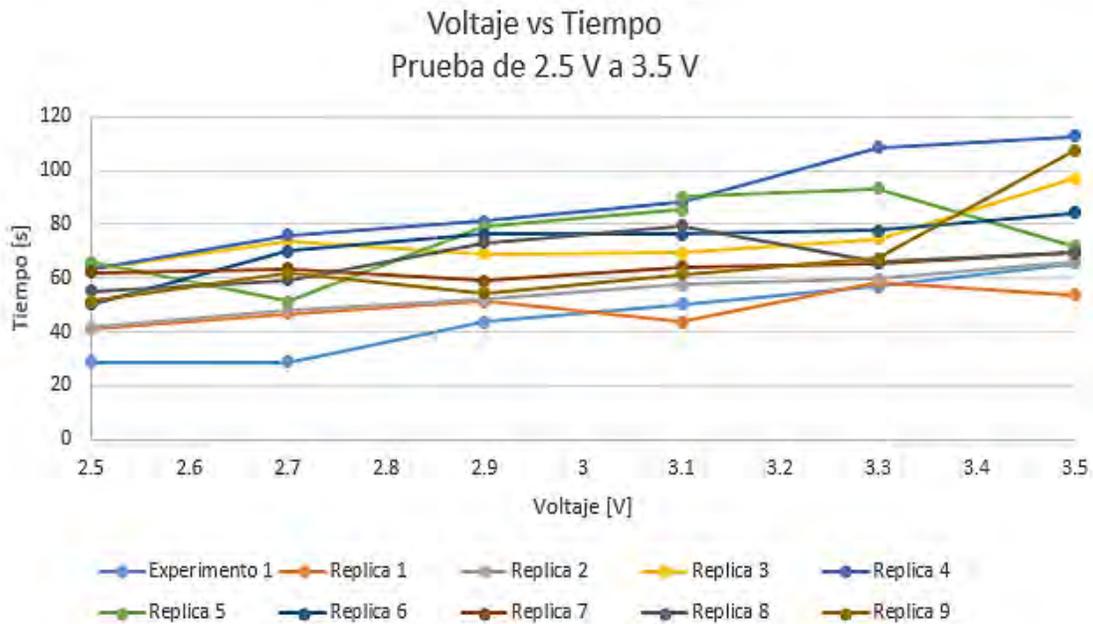


Figura 0.4 Comportamiento del amortiguador-Tabla 5.4

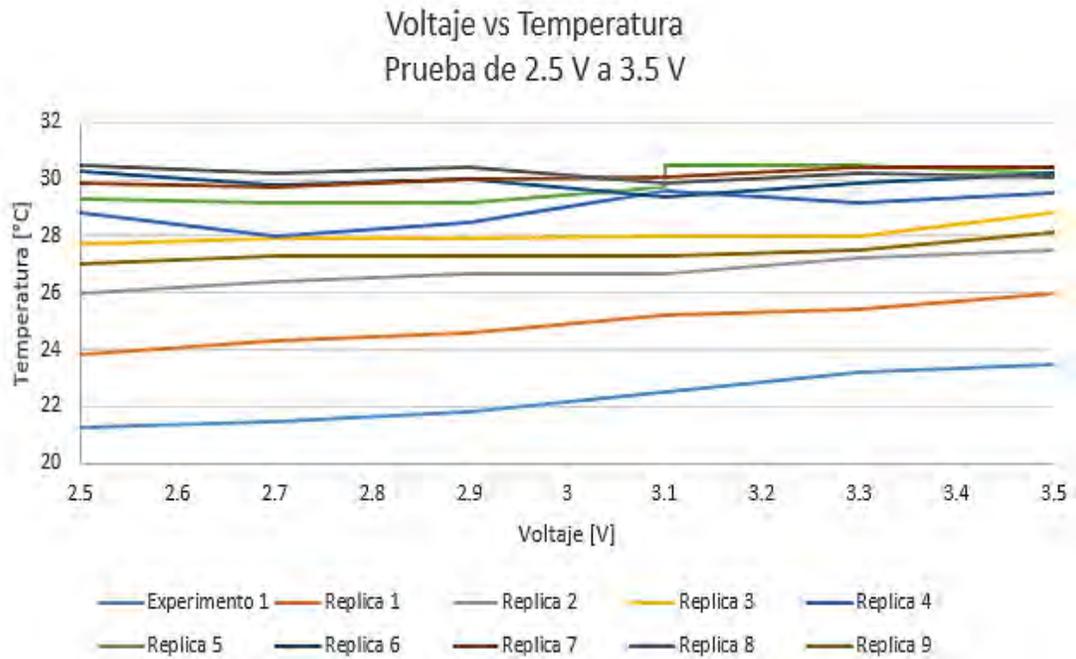


Figura 0.5 Relación Voltaje vs Temperatura-Tabla 5.4

Anexo resultados de prueba 2:

Tabla 0.5 Resultados Prueba 2

| <i>EXPERIMENTO-->CAMBIO DE PESO</i> | | | | | | |
|--|--------------------|----------------------|-------------------|--|-----------------------------|--|
| <i>Pruebas</i> | | | | | | |
| *Calentamiento Previo a 2.9 V-0.65A | | | | | | |
| * Temperatura inicia: 16.1 °C | | | | | | |
| *Tiempo de calentamiento: 22.35 min | | | | | | |
| *Temperatura final: 23.2 °C | | | | | | |
| <u>Masa [Kg]</u> | <u>Voltaje [V]</u> | <u>Corriente [A]</u> | <u>Tiempo [s]</u> | <u>Distancia Desplazada [cm]</u> | <u>Temperatura [°C]</u> | |
| * "Prueba de Calentamiento" | | | | | | |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 29.08 | 3.5 | 23.1 | |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 21.3 | 3.5 | 22.9 | |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 16.62 | 3.5 | 23.2 | |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 37.9 | 3.5 | 23.2 | |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 29.81 | 3.5 | 23.3 | |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 24.88 | 3.5 | 23 | |

| | | | | | |
|-----------|-----|------|-------|-----|------|
| | | | | | |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 46.9 | 3.5 | 23.2 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 32.46 | 3.5 | 23.2 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 25.91 | 3.5 | 23.4 |
| | | | | | |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 38.1 | 3.5 | 23.2 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 29.98 | 3.5 | 23.3 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 22.13 | 3.5 | 23.5 |
| | | | | | |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 39.55 | 3.5 | 23.6 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 29.31 | 3.5 | 23.6 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 22.37 | 3.5 | 23.4 |
| | | | | | |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 41.24 | 3.5 | 23.3 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 32.4 | 3.5 | 23.4 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 20.25 | 3.5 | 23.5 |
| | | | | | |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 44.95 | 3.5 | 23.3 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 34.29 | 3.5 | 24.1 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 24.13 | 3.5 | 24.4 |
| | | | | | |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 52 | 3.5 | 23.5 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 30.66 | 3.5 | 24.6 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 22.9 | 3.5 | 24.4 |
| | | | | | |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 45.85 | 3.5 | 24.5 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 32.62 | 3.5 | 24.6 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 23.08 | 3.5 | 24.5 |
| | | | | | |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 46.21 | 3.5 | 24.5 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 36.33 | 3.5 | 24.8 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 22.54 | 3.5 | 24.8 |
| | | | | | |

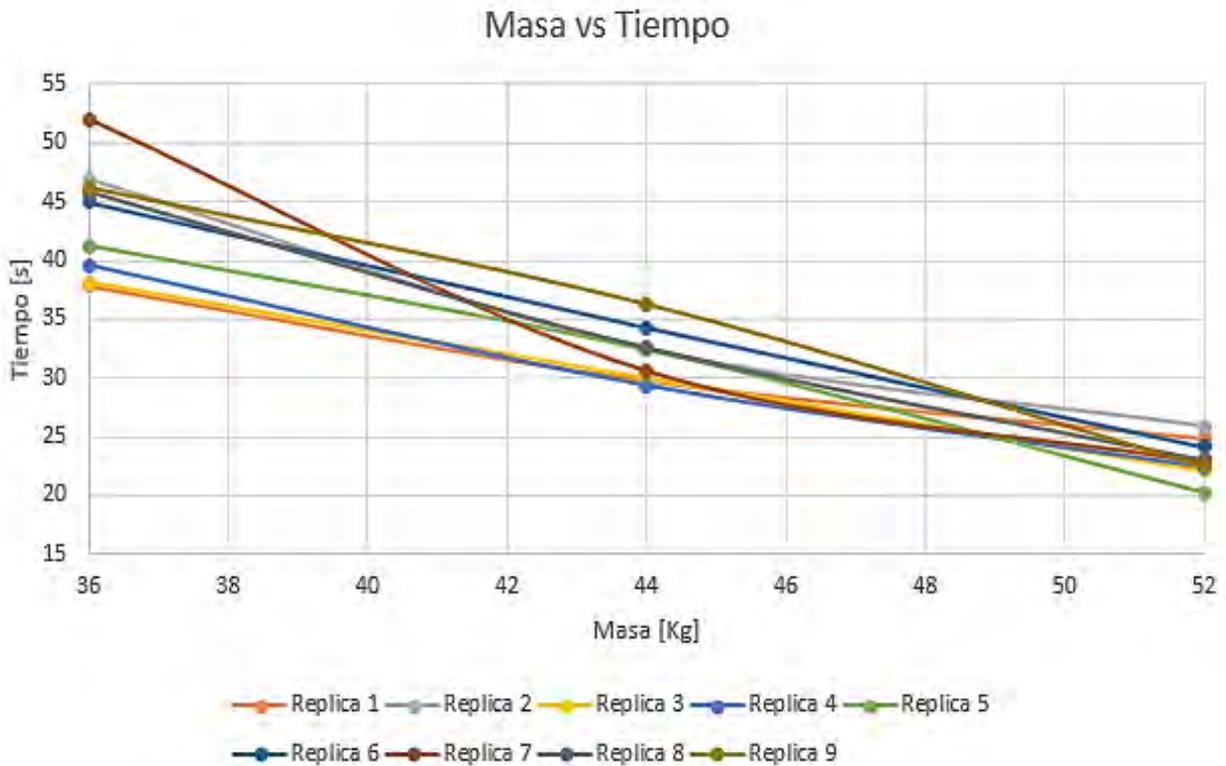


Figura 0.6 Relación Masa vs Tiempo-Tabla 5.5

Tabla 0.6 Resultados Prueba 2

| EXPERIMENTO-->CAMBIO DE PESO | | | | | |
|--|--------------------|----------------------|-------------------|--|-----------------------------|
| <u>Pruebas</u> | | | | | |
| *Calentamiento Previo a 2.9 V-0.65A | | | | | |
| * Temperatura inicia: 10.4 °C | | | | | |
| *Tiempo de calentamiento: 30.24 min | | | | | |
| *Temperatura final: 24.1 °C | | | | | |
| <u>Masa [Kg]</u> | <u>Voltaje [V]</u> | <u>Corriente [A]</u> | <u>Tiempo [s]</u> | <u>Distancia Desplazada [cm]</u> | <u>Temperatura [°C]</u> |
| * "Prueba de Calentamiento" | | | | | |
| 36 | 2.9 | 0.64 | 900.62 | 3.5 | 20.5 |
| 44 | 2.9 | 0.64 | 154.14 | 3.5 | 20.3 |
| 52 | 2.9 | 0.64 | 90.57 | 3.5 | 20.1 |
| 36 | 2.9 | 0.64 | 190.79 | 3.5 | 21.1 |
| 44 | 2.9 | 0.64 | 99.79 | 3.5 | 21 |
| 52 | 2.9 | 0.64 | 49.36 | 3.5 | 21 |
| 36 | 2.9 | 0.64 | 192.05 | 3.5 | 20.9 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 122.23 | 3.5 | 21.2 |

| | | | | | |
|----|-----|------|--------|-----|------|
| 52 | 2.9 | 0.65 | 68.55 | 3.5 | 21.2 |
| 36 | 3 | 0.65 | 122.77 | 3.5 | 21.2 |
| 44 | 3 | 0.65 | 59.93 | 3.5 | 21 |
| 52 | 3 | 0.65 | 35.04 | 3.5 | 20.9 |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 83.59 | 3.5 | 20.9 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 57.42 | 3.5 | 20.8 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 33.73 | 3.5 | 21.2 |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 72.54 | 3.5 | 20.9 |
| 44 | 2.9 | 0.64 | 46.92 | 3.5 | 20.9 |
| 52 | 2.9 | 0.63 | 33.07 | 3.5 | 20.5 |
| 36 | 2.9 | 0.63 | 164.54 | 3.5 | 20.8 |
| 44 | 2.9 | 0.64 | 115.95 | 3.5 | 21.1 |
| 52 | 2.9 | 0.64 | 66.73 | 3.5 | 20.7 |



Figura 0.7 Relación Masa vs Tiempo-Tabla 5.6

Tabla 0.7 Resultados Prueba 2

| EXPERIMENTO-->CAMBIO DE PESO | | | | | |
|--|--------------------|----------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------------|
| <u>Pruebas</u> | | | | | |
| *Calentamiento Previo a 2.9 V-0.65A | | | | | |
| * Temperatura inicia: 11.9 °C | | | | | |
| *Tiempo de calentamiento: 42.23 min | | | | | |
| *Temperatura final: 21 °C | | | | | |
| MASA [KG] | VOLTAJE [v] | CORRIENTE [A] | TIEMPO [s] | Distancia Desplazada [cm] | Temperatura [°C] |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 83.41 | 3.5 | 21.9 |
| 44 | 2.9 | 0.66 | 616.08 | 3.5 | 21.9 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 70.85 | 3.5 | 20.8 |
| * "Prueba de Calentamiento" | | | | | |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 59.83 | 3.5 | 21.8 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 43.22 | 3.5 | 21.7 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 17.98 | 3.5 | 21.6 |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 46.92 | 3.5 | 21.7 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 30.76 | 3.5 | 21.6 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 23.15 | 3.5 | 21.4 |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 51.36 | 3.5 | 21.6 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 29.86 | 3.5 | 22 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 20.17 | 3.5 | 22.1 |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 52.18 | 3.5 | 22.3 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 38.52 | 3.5 | 22.1 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 30.78 | 3.5 | 22.2 |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 68.91 | 3.5 | 22.5 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 30.98 | 3.5 | 22.1 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 29.41 | 3.5 | 22.4 |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 48 | 3.5 | 22.6 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 42.25 | 3.5 | 22.6 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 31.66 | 3.5 | 22.7 |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 54.08 | 3.5 | 22.5 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 34.49 | 3.5 | 22.6 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 24.67 | 3.5 | 22.7 |

| | | | | | |
|-----------|-----|------|-------|-----|------|
| 36 | 2.9 | 0.65 | 69.31 | 3.5 | 22.9 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 44.29 | 3.5 | 23.2 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 28.59 | 3.5 | 22.9 |
| 36 | 2.9 | 0.65 | 69.83 | 3.5 | 22.8 |
| 44 | 2.9 | 0.65 | 43.19 | 3.5 | 22.6 |
| 52 | 2.9 | 0.65 | 28.2 | 3.5 | 22.5 |



Figura 0.8 Relación Masa vs Tiempo-Tabla 5.7

Modelo del amortiguador

Tabla 0.8 Conjunto 1_Ecu. Amortiguador

| EXPERIMENTO-->CAMBIO DE PESO | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-------------|------------|------------|-----|--------|---------|------|-----------|---------|---------|---------|----------|---------|-----------------|-------------------|--|
| Pruebas | | | | | | | | | | | | | | Ecuación | | |
| MASA [KG] | VOLTAJE [v] | TIEMPO [s] | Temp. [°C] | X | Y | XY | X2 | Y2 | a | b | r | r% | Y | | | |
| 36 | 2.9 | 29.08 | 23.1 | 36 | 29.08 | 1046.88 | 1296 | 845.6464 | | | | | 28.5633 | | | |
| 44 | 2.9 | 21.3 | 22.9 | 44 | 21.3 | 937.2 | 1936 | 453.69 | | | | | 22.3333 | | | |
| 52 | 2.9 | 16.62 | 23.2 | 52 | 16.62 | 864.24 | 2704 | 276.2244 | | | | | 16.1033 | Temp. Prom [°C] | Ecuación | |
| | | | | 132 | 67 | 2848.32 | 5936 | 1575.5608 | -0.7788 | 56.5983 | -0.9898 | 97.9784% | | 23.0667 | y=56.5883-0.7787x | |
| | | | | X | Y | XY | X2 | Y2 | a | b | r | r% | Y | | | |
| 36 | 2.9 | 37.9 | 23.2 | 36 | 37.9 | 1364.4 | 1296 | 1436.41 | | | | | 37.3733 | | | |
| 44 | 2.9 | 29.81 | 23.3 | 44 | 29.81 | 1311.64 | 1936 | 888.6361 | | | | | 30.8633 | | | |
| 52 | 2.9 | 24.88 | 23 | 52 | 24.88 | 1293.76 | 2704 | 619.0144 | | | | | 24.3533 | Temp. Prom [°C] | Ecuación | |
| | | | | 132 | 92.59 | 3969.8 | 5936 | 2944.0605 | -0.8137 | 66.6683 | -0.9903 | 98.0743% | | 23.1667 | y=66.6683-0.9903x | |
| | | | | X | Y | XY | X2 | Y2 | a | b | r | r% | Y | | | |
| 36 | 2.9 | 46.9 | 23.2 | 36 | 46.9 | 1688.4 | 1296 | 2199.61 | | | | | 45.5850 | | | |
| 44 | 2.9 | 32.46 | 23.2 | 44 | 32.46 | 1428.24 | 1936 | 1053.6516 | | | | | 35.0900 | | | |
| 52 | 2.9 | 25.91 | 23.4 | 52 | 25.91 | 1347.32 | 2704 | 671.3281 | | | | | 24.5950 | Temp. Prom [°C] | Ecuación | |
| | | | | 132 | 105.27 | 4463.96 | 5936 | 3924.5897 | -1.3119 | 92.8125 | -0.9773 | 95.5020% | | 23.2667 | y=92.8125-1.3118x | |
| | | | | X | Y | XY | X2 | Y2 | a | b | r | r% | Y | | | |
| 36 | 2.9 | 38.1 | 23.2 | 36 | 38.1 | 1371.6 | 1296 | 1451.61 | | | | | 38.055 | | | |
| 44 | 2.9 | 29.98 | 23.3 | 44 | 29.98 | 1319.12 | 1936 | 898.8004 | | | | | 30.07 | | | |
| 52 | 2.9 | 22.13 | 23.5 | 52 | 22.13 | 1150.76 | 2704 | 489.7369 | | | | | 22.085 | Temp. Prom [°C] | Ecuación | |
| | | | | 132 | 90.21 | 3841.48 | 5936 | 2840.1473 | -0.9981 | 73.9875 | -1.0000 | 99.9905% | | 23.3333 | y=73.9875-0.9912x | |
| | | | | X | Y | XY | X2 | Y2 | a | b | r | r% | Y | | | |
| 36 | 2.9 | 39.55 | 23.6 | 36 | 39.55 | 1423.8 | 1296 | 1564.2025 | | | | | 39 | | | |
| 44 | 2.9 | 29.31 | 23.6 | 44 | 29.31 | 1289.64 | 1936 | 859.0761 | | | | | 30.41 | | | |
| 52 | 2.9 | 22.37 | 23.4 | 52 | 22.37 | 1163.24 | 2704 | 500.4169 | | | | | 21.82 | Temp. Prom [°C] | Ecuación | |
| | | | | 132 | 91.23 | 3876.68 | 5936 | 2923.6955 | -1.0738 | 77.6550 | -0.9939 | 98.7851% | | 23.5333 | y=77.655-1.07375x | |

Tabla 0.9 Conjunto 2_Ecu. Amortiguador

| EXPERIMENTO-->CAMBIO DE PESO | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-------------|------------|------------------|-----|--------|----------|----------------|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| Pruebas | | | | | | | | | | | Ecuación | | | |
| MASA [KG] | VOLTAJE [v] | TIEMPO [s] | Temperatura [°C] | X | Y | XY | X ² | Y ² | a | b | r | r % | Y | |
| 36 | 2.9 | 258.48 | 23.6 | 36 | 258.48 | 9305.28 | 1296 | 66811.9104 | | | | | 275.5633 | |
| 44 | 2.9 | 192.87 | 23.4 | 44 | 192.87 | 8486.28 | 1936 | 37198.8369 | | | | | 158.7033 | |
| 52 | 2.9 | 24.76 | 23.7 | 52 | 24.76 | 1287.52 | 2704 | 613.0576 | | | | | 41.8433 | Temp. Prom [°C] |
| | | | | 132 | 476.11 | 19079.08 | 5936 | 104623.8049 | -14.6075 | 801.4333 | -0.9694 | 93.9751% | 23.5667 | Ecuación |
| | | | | X | Y | XY | X ² | Y ² | a | b | r | r % | Y | y=801.4333-14.6075x |
| 36 | 2.9 | 38.5 | 23.9 | 36 | 38.5 | 1386 | 1296 | 1482.25 | | | | | 38.9000 | |
| 44 | 2.9 | 34.22 | 23.9 | 44 | 34.22 | 1505.68 | 1936 | 1171.0084 | | | | | 33.4200 | |
| 52 | 2.9 | 27.54 | 24.2 | 52 | 27.54 | 1432.08 | 2704 | 758.4516 | | | | | 27.9400 | Temp. Prom [°C] |
| | | | | 132 | 100.26 | 4323.76 | 5936 | 3411.71 | -0.6850 | 63.5600 | -0.9921 | 98.4268% | 24.0000 | Ecuación |
| | | | | X | Y | XY | X ² | Y ² | a | b | r | r % | Y | y=63.56-0.685x |
| 36 | 2.9 | 62.35 | 24.5 | 36 | 62.35 | 2244.6 | 1296 | 3887.5225 | | | | | 59.8150 | |
| 44 | 2.9 | 38.01 | 24.4 | 44 | 38.01 | 1672.44 | 1936 | 1444.7601 | | | | | 43.0800 | |
| 52 | 2.9 | 28.88 | 24.4 | 52 | 28.88 | 1501.76 | 2704 | 834.0544 | | | | | 26.3450 | Temp. Prom [°C] |
| | | | | 132 | 129.24 | 5418.8 | 5936 | 6166.337 | -2.0919 | 135.1225 | -0.9673 | 93.5596% | 24.4333 | Ecuación |
| | | | | X | Y | XY | X ² | Y ² | a | b | r | r % | Y | y=135.1225-2.0918x |
| 36 | 2.9 | 72.15 | 24.6 | 36 | 72.15 | 2597.4 | 1296 | 5205.6225 | | | | | 68.9033 | |
| 44 | 2.9 | 41.45 | 24.5 | 44 | 41.45 | 1823.8 | 1936 | 1718.1025 | | | | | 47.9433 | |
| 52 | 2.9 | 30.23 | 24.6 | 52 | 30.23 | 1571.96 | 2704 | 913.8529 | | | | | 26.9833 | Temp. Prom [°C] |
| | | | | 132 | 143.83 | 5993.16 | 5936 | 7837.5779 | -2.6200 | 163.2233 | -0.9658 | 93.2853% | 24.5667 | Ecuación |
| | | | | X | Y | XY | X ² | Y ² | a | b | r | r % | Y | y=163.2233-2.62x |
| 36 | 2.9 | 65.03 | 24.8 | 36 | 65.03 | 2341.08 | 1296 | 4228.9009 | | | | | 62.9083 | |
| 44 | 2.9 | 42.32 | 24.6 | 44 | 42.32 | 1862.08 | 1936 | 1790.9824 | | | | | 46.5633 | |
| 52 | 2.9 | 32.34 | 24.7 | 52 | 32.34 | 1681.68 | 2704 | 1045.8756 | | | | | 30.2183 | Temp. Prom [°C] |
| | | | | 132 | 139.69 | 5884.84 | 5936 | 7065.7589 | -2.0431 | 136.4608 | -0.9756 | 95.1884% | 24.7000 | Ecuación |
| | | | | X | Y | XY | X ² | Y ² | a | b | r | r % | Y | y=136.4608-2.0431x |

Tabla 0.10 Conjunto 3_Ecu. Amortiguador

| EXPERIMENTO-->CAMBIO DE PESO | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-------------|------------|------------|-----|--------|---------|----------------|----------------|---------|----------|---------|----------------|---------|
| Pruebas | | | | | | | | | | | | Ecuación | |
| MASA [KG] | VOLTAJE [v] | TIEMPO [s] | Temp. [°C] | X | Y | XY | X ² | Y ² | a | b | r | r % | Y |
| 36 | 2.9 | 39.55 | 23.6 | 36 | 39.55 | 1423.8 | 1296 | 1564.2025 | | | | | 39 |
| 44 | 2.9 | 29.31 | 23.6 | 44 | 29.31 | 1289.64 | 1936 | 859.0761 | | | | | 30.41 |
| 52 | 2.9 | 22.37 | 23.4 | 52 | 22.37 | 1163.24 | 2704 | 500.4169 | | | | | 21.82 |
| | | | | 132 | 91.23 | 3876.68 | 5936 | 2923.6955 | -1.0738 | 77.6550 | -0.9939 | 98.7851% | |
| | | | | X | Y | XY | X ² | Y ² | a | b | r | r % | Y |
| 36 | 2.9 | 41.24 | 23.3 | 36 | 41.24 | 1484.64 | 1296 | 1700.7376 | | | | | 41.7917 |
| 44 | 2.9 | 32.4 | 23.4 | 44 | 32.4 | 1425.6 | 1936 | 1049.76 | | | | | 31.2967 |
| 52 | 2.9 | 20.25 | 23.5 | 52 | 20.25 | 1053 | 2704 | 410.0625 | | | | | 20.8017 |
| | | | | 132 | 93.89 | 3963.24 | 5936 | 3160.5601 | -1.3119 | 89.0192 | -0.9959 | 99.1779% | |
| | | | | X | Y | XY | X ² | Y ² | a | b | r | r % | Y |
| 36 | 2.9 | 44.95 | 23.3 | 36 | 44.95 | 1618.2 | 1296 | 2020.5025 | | | | | 44.8667 |
| 44 | 2.9 | 34.29 | 24.1 | 44 | 34.29 | 1508.76 | 1936 | 1175.8041 | | | | | 34.4567 |
| 52 | 2.9 | 24.13 | 24.4 | 52 | 24.13 | 1254.76 | 2704 | 582.2569 | | | | | 24.0467 |
| | | | | 132 | 103.37 | 4381.72 | 5936 | 3778.5635 | -1.3013 | 91.7117 | -0.9999 | 99.9808% | |
| | | | | X | Y | XY | X ² | Y ² | a | b | r | r % | Y |
| 36 | 2.9 | 52 | 23.5 | 36 | 52 | 1872 | 1296 | 2704 | | | | | 49.7367 |
| 44 | 2.9 | 30.66 | 24.6 | 44 | 30.66 | 1349.04 | 1936 | 940.0356 | | | | | 35.1867 |
| 52 | 2.9 | 22.9 | 24.4 | 52 | 22.9 | 1190.8 | 2704 | 524.41 | | | | | 20.6367 |
| | | | | 132 | 105.56 | 4411.84 | 5936 | 4168.4456 | -1.8188 | 115.2117 | -0.9656 | 93.2320% | |
| | | | | X | Y | XY | X ² | Y ² | a | b | r | r % | Y |
| 36 | 2.9 | 45.85 | 24.5 | 36 | 45.85 | 1650.6 | 1296 | 2102.2225 | | | | | 45.235 |
| 44 | 2.9 | 32.62 | 24.6 | 44 | 32.62 | 1435.28 | 1936 | 1064.0644 | | | | | 33.85 |
| 52 | 2.9 | 23.08 | 24.5 | 52 | 23.08 | 1200.16 | 2704 | 532.6864 | | | | | 22.465 |
| | | | | 132 | 101.55 | 4286.04 | 5936 | 3698.9733 | -1.4231 | 96.4675 | -0.9957 | 99.1322% | |
| | | | | X | Y | XY | X ² | Y ² | b | a | r | r ² | Y |
| 36 | 2.9 | 46.21 | 24.5 | 36 | 46.21 | 1663.56 | 1296 | 2135.3641 | | | | | 46.8617 |
| 44 | 2.9 | 36.33 | 24.8 | 44 | 36.33 | 1598.52 | 1936 | 1319.8689 | | | | | 35.0267 |
| 52 | 2.9 | 22.54 | 24.8 | 52 | 22.54 | 1172.08 | 2704 | 508.0516 | | | | | 23.1917 |
| | | | | 132 | 105.08 | 4434.16 | 5936 | 3963.2846 | -1.4794 | 100.1192 | -0.9955 | 99.0986% | |
| | | | | X | Y | XY | X ² | Y ² | b | a | r | r ² | Y |

De todos los conjuntos de experimentos realizados en la prueba 2 se muestra en la tabla 5.11 los valores con un mínimo de 93.07 % de correlación.

Tabla 0.11 Relación lineal de ecuaciones

| Ecuaciones encontradas de prueba 2 | | |
|------------------------------------|-----------|-----------------------|
| Correlación (r%) | Temp [°C] | Ecuación |
| 93.0748% | 22.8333 | $y=44.4091-0.3743x$ |
| 93.2320% | 24.1667 | $y=115.2116-1.81875x$ |
| 93.2853% | 24.5667 | $y=163.2233-2.62x$ |
| 93.4197% | 25.3333 | $y=110.5475-1.4806x$ |
| 93.4993% | 23.1333 | $y=123.1525-1.9993x$ |
| 93.5342% | 25.5333 | $y=160.1625-2.4168x$ |
| 93.5596% | 24.4333 | $y=135.1225-2.0918x$ |
| 93.5811% | 25.7000 | $y=142.1366-2.1025x$ |
| 93.9751% | 23.5667 | $y=801.4333-14.6075x$ |
| 93.9869% | 23.9667 | $y=172.3316-2.71625x$ |
| 94.1288% | 21.0333 | $y=313.8375-5.4831x$ |
| 94.1654% | 24.6667 | $y=162.3816-2.56875x$ |
| 94.2078% | 21.9667 | $y=82.1475-1.1831x$ |
| 94.3081% | 23.0333 | $y=109.4583-1.6362x$ |
| 94.3863% | 24.4333 | $y=133.2091-1.9693x$ |
| 94.4011% | 25.9000 | $y=155.8583-2.3262x$ |
| 94.8430% | 25.3667 | $y=137.075-1.99625x$ |
| 94.8849% | 24.2667 | $y=192.075-3.0212$ |
| 95.1884% | 24.7000 | $y=136.4608-2.0431x$ |
| 95.3194% | 23.9333 | $y=130.76-1.915x$ |
| 95.3299% | 21.7000 | $y=681.5075-12.1931x$ |
| 95.4389% | 21.9000 | $y=119.5691-1.9493x$ |
| 95.4877% | 22.4000 | $y=53.505-0.30875x$ |
| 95.5020% | 23.2667 | $y=92.8125-1.3118x$ |
| 95.8285% | 19.5000 | $y=710.5441-13.000x$ |
| 95.8656% | 21.5667 | $y=98.9775-1.4856x$ |
| 96.1540% | 21.9000 | $y=108.3083-1.3387x$ |
| 96.1895% | 23.5000 | $y=114.2975-1.6806x$ |
| 96.3927% | 25.5333 | $y=122.0725-1.6843x$ |
| 96.4520% | 22.6000 | $y=118.6241-1.8381x$ |
| 96.8331% | 25.0333 | $y=146.245-2.23875x$ |
| 96.9235% | 24.2333 | $y=74.1375-0.8081x$ |
| 96.9629% | 23.8333 | $y=111.3683-1.5862x$ |
| 97.1212% | 20.7667 | $y=159.3858-2.4668x$ |
| 97.1585% | 22.6333 | $y=85.5716-1.0212x$ |
| 97.3304% | 21.0333 | $y=502.2458-8.8393x$ |

| Correlación (r%) | Temp [°C] | Ecuación |
|------------------|-----------|-----------------------|
| 97.4559% | 22.6333 | $y=161.5558-2.6001x$ |
| 97.5125% | 22.2000 | $y=99.3433-1.3375x$ |
| 97.9303% | 25.1333 | $y=139.91-2.085x$ |
| 97.9784% | 23.0667 | $y=56.5883-0.7787x$ |
| 98.0515% | 25.2000 | $y=62.5191-0.4018x$ |
| 98.0743% | 23.1667 | $y=66.6683-0.9903x$ |
| 98.2017% | 23.0000 | $y=105.1716-1.5412x$ |
| 98.2288% | 23.8333 | $y=135.4208-2.0181x$ |
| 98.2322% | 25.1333 | $y=133.476-1.8775x$ |
| 98.2838% | 23.0000 | $y=159.3766-2.545x$ |
| 98.3433% | 25.8667 | $y=139.6041-2.0156x$ |
| 98.4268% | 24.0000 | $y=63.56-0.685x$ |
| 98.5195% | 21.9333 | $y=79.2048-0.9331x$ |
| 98.5647% | 25.1000 | $y=156.9191-2.3293x$ |
| 98.6024% | 21.7000 | $y=155.4308-2.6156x$ |
| 98.7851% | 23.5333 | $y=77.655-1.07375x$ |
| 98.9586% | 25.6333 | $y=95.1566-1.21x$ |
| 99.0023% | 23.6000 | $y=136.7408-2.0956x$ |
| 99.0630% | 25.5333 | $y=121.056-1.6325x$ |
| 99.0881% | 23.8000 | $y=135.4208-2.0181x$ |
| 99.0986% | 24.7000 | $y=100.1191-1.4793x$ |
| 99.1249% | 22.9667 | $y=52.8366-0.6375x$ |
| 99.1322% | 24.5333 | $y=96.4675-1.4231x$ |
| 99.1336% | 22.8333 | $y=108.065-1.27375x$ |
| 99.1779% | 23.4000 | $y=89.0191-1.3111x$ |
| 99.4034% | 25.3000 | $y=87.3391-1.02935x$ |
| 99.4339% | 21.1000 | $y=467.235-7.71875x$ |
| 99.5172% | 23.2000 | $y=221.0141-3.8181x$ |
| 99.9176% | 20.9667 | $y=195.3616-3.11625x$ |
| 99.9525% | 26.1000 | $y=133.2441-1.8706x$ |
| 99.9808% | 23.9333 | $y=91.7116-1.3012x$ |
| 99.9905% | 23.3333 | $y=73.9875-0.9912x$ |
| 99.9986% | 20.8667 | $y=384.7175-6.1131x$ |

De los valores mostrados en la tabla 5.11 se acota la tabla a los valores con un mínimo de 98.51 % de correlación, con el fin de obtener ecuaciones más precisas, creando la tabla 5.12).

Tabla 0.12 Relación lineal de ecuaciones acotadas

| <u>Orden por temperatura---Acotación a 98.51%</u> | | |
|---|------------------|-----------------------|
| <u>Correlación</u> | <u>Temp [°C]</u> | <u>Ecuación</u> |
| <u>(r%)</u> | | |
| 99.9986% | 20.8667 | $y=384.7175-6.1131x$ |
| 99.9176% | 20.9667 | $y=195.3616-3.11625x$ |
| 99.4339% | 21.1000 | $y=467.235-7.71875x$ |
| 98.6024% | 21.7000 | $y=155.4308-2.6156x$ |
| 98.5195% | 21.9333 | $y=79.2048-0.9331x$ |
| 99.9285% | 22.6333 | $y=103.5941-1.4706x$ |
| 99.1336% | 22.8333 | $y=108.065-1.27375x$ |
| 99.9761% | 22.8667 | $y=89.4925-1.1893x$ |
| 99.1249% | 22.9667 | $y=52.8366-0.6375x$ |
| 99.5172% | 23.2000 | $y=221.0141-3.8181x$ |
| 99.9905% | 23.3333 | $y=73.9875-0.9912x$ |
| 99.1779% | 23.4000 | $y=89.0191-1.3111x$ |
| 98.7851% | 23.5333 | $y=77.655-1.07375x$ |
| 99.0023% | 23.6000 | $y=136.7408-2.0956x$ |
| 99.0881% | 23.8000 | $y=135.4208-2.0181x$ |
| 99.9808% | 23.9333 | $y=91.7116-1.3012x$ |
| 99.1322% | 24.5333 | $y=96.4675-1.4231x$ |
| 99.0986% | 24.7000 | $y=100.1191-1.4793x$ |
| 98.5647% | 25.1000 | $y=156.9191-2.3293x$ |
| 98.7177% | 25.1000 | $y=149.8683-2.3112x$ |
| 99.4034% | 25.3000 | $y=87.3391-1.02935x$ |
| 99.0630% | 25.5333 | $y=121.056-1.6325x$ |
| 98.9586% | 25.6333 | $y=95.1566-1.21x$ |
| 99.9525% | 26.1000 | $y=133.2441-1.8706x$ |

Tabla 0.13 Nuevas ecuaciones promedio

| Temp [°C] | Ecuación Promedio |
|-----------|-----------------------|
| 20.6 | $y=82.3067-1.1025x$ |
| 21.8166 | $y=117.3178-1.77435x$ |
| 22.8666 | $y=89.4925-1.1893x$ |
| 22.9 | $y=80.4508-0.9556x$ |
| 23.3666 | $y=81.5033-1.1511x$ |
| 23.7166 | $y=110.38205-1.6221x$ |
| 24.6166 | $y=98.2933-1.4512x$ |
| 25.2 | $y=122.1291-1.6793x$ |
| 25.5833 | $y=108.1063-1.42125x$ |
| 26.1 | $y=133.2441-1.8706x$ |

Tabla 0.14 Obtención de Velocidades

| Datos Iniciales: | | <i>Distancia=3.5 cm Masa = 44 kg</i> | | Voltaje = 2.9 V | |
|------------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------|-----------------|---------------------------|
| Temp [°C] | Ecuación Promedio | Distancia | <i>b</i> | <i>a</i> | $\frac{V=d/y(t)}{[cm/s]}$ |
| 20.6 | $y=82.3067-1.1025x$ | 3.6 | 82.3067 | 1.1025 | 0.106519276 |
| 21.816667 | $y=117.3178-1.77435x$ | 3.6 | 117.3178 | 1.77435 | 0.091728159 |
| 22.866667 | $y=89.4925-1.1893x$ | 3.6 | 89.4925 | 1.1893 | 0.096869761 |
| 22.9 | $y=80.4508-0.9556x$ | 3.6 | 80.4508 | 0.9556 | 0.093739259 |
| 23.366667 | $y=81.5033-1.1511x$ | 3.6 | 81.5083 | 1.1511 | 0.116656243 |
| 23.716667 | $y=110.38205-1.6221x$ | 3.6 | 110.38205 | 1.6221 | 0.092284858 |
| 24.616667 | $y=98.2933-1.4512x$ | 3.6 | 98.2933 | 1.4512 | 0.104528099 |
| 25.2 | $y=122.1291-1.6793x$ | 3.6 | 122.1291 | 1.6793 | 0.07462702 |
| 25.583333 | $y=108.1063-1.42125x$ | 3.6 | 108.1063 | 1.4212 | 0.078993275 |
| 26.1 | $y=133.2441-1.8706x$ | 3.6 | 133.2441 | 1.8706 | 0.070674569 |

Anexo resultados de prueba 3:

Tabla 0.15 Comparación de tiempos -Prueba 3

| Rango de temperatura de trabajo : | | | 15.3-19.6 °C | | |
|-----------------------------------|----------------|------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| Temp [°C] | Distancia [cm] | Velocidad [cm/s] | Tiempo Esperado [s] | Tiempo Medido [s] | Prom. Medido [s] |
| 15.3 | 1 | 0.106519276 | 9.387972222 | 3.06 | |
| 15.6 | 1 | 0.106519276 | 9.387972222 | 3.26 | |
| 15.7 | 1 | 0.106519276 | 9.387972222 | 3.58 | |
| 16.3 | 1 | 0.106519276 | 9.387972222 | 4.75 | |
| 16.4 | 1 | 0.106519276 | 9.387972222 | 4.25 | 3.78 |
| 17 | 1.6 | 0.106519276 | 15.02075556 | 19.99 | |
| 17.4 | 1.6 | 0.106519276 | 15.02075556 | 15.54 | |
| 17.5 | 1.6 | 0.106519276 | 15.02075556 | 15.2 | |
| 17.9 | 1.6 | 0.106519276 | 15.02075556 | 18.68 | |
| 18.1 | 1.6 | 0.106519276 | 15.02075556 | 32.19 | 20.32 |
| 18.3 | 2 | 0.106519276 | 18.77594444 | 15.86 | |
| 18.6 | 2 | 0.106519276 | 18.77594444 | 14.92 | |
| 18.7 | 2 | 0.106519276 | 18.77594444 | 17.15 | |
| 18.8 | 2 | 0.106519276 | 18.77594444 | 18.29 | |
| 18.8 | 2 | 0.106519276 | 18.77594444 | 17.64 | 16.772 |
| 18.9 | 2.3 | 0.091728159 | 25.07408889 | 18.66 | |
| 19.3 | 2.3 | 0.091728159 | 25.07408889 | 19.96 | |
| 19.4 | 2.3 | 0.091728159 | 25.07408889 | 25.45 | |
| 19.4 | 2.3 | 0.091728159 | 25.07408889 | 18.86 | |
| 19.6 | 2.3 | 0.091728159 | 25.07408889 | 21.67 | 20.92 |

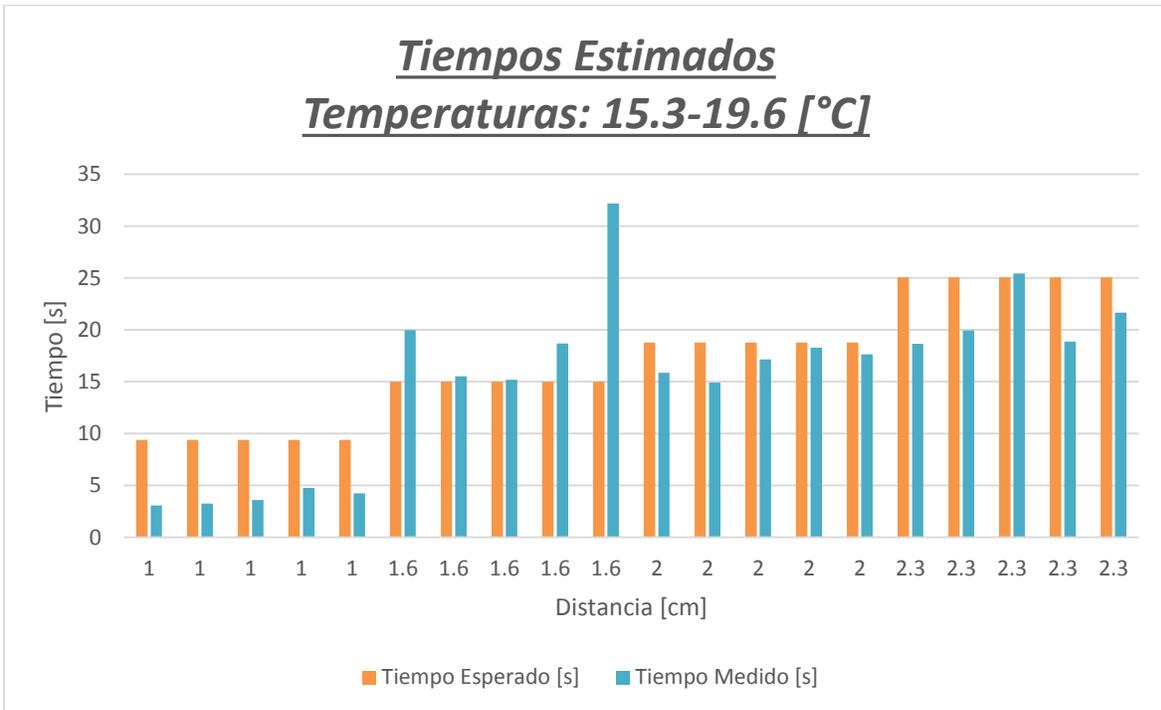


Figura 0.9 Comparación de tiempos_2

Tabla 0.16 Comparación de tiempos -Prueba 3

| Rango de temperatura de trabajo : | | | 19.1-24.3 °C | | |
|-----------------------------------|----------------|------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| Temp [°C] | Distancia [cm] | Velocidad [cm/s] | Tiempo Esperado [s] | Tiempo Medido [s] | Prom. Medido [s] |
| 19.1 | 1 | 0.106519276 | 3.477972222 | 3.15 | |
| 19.4 | 1 | 0.106519276 | 3.477972222 | 2.8 | |
| 19.6 | 1 | 0.106519276 | 3.477972222 | 2.76 | |
| 19.9 | 1 | 0.106519276 | 3.477972222 | 3.07 | |
| 19.9 | 1 | 0.106519276 | 3.477972222 | 2.76 | |
| 20.3 | 1 | 0.106519276 | 3.477972222 | 4.02 | |
| 20.3 | 1 | 0.106519276 | 3.477972222 | 3.86 | 3.202857143 |
| 20.7 | 1.6 | 0.106519276 | 10.56905556 | 8.68 | |
| 20.9 | 1.6 | 0.106519276 | 10.56905556 | 8.93 | |
| 21.7 | 1.6 | 0.091728159 | 12.99114444 | 9.61 | |
| 21.7 | 1.6 | 0.091728159 | 12.99114444 | 9.38 | |
| 21.7 | 1.6 | 0.091728159 | 12.99114444 | 9.35 | |
| 22.6 | 1.6 | 0.092574259 | 12.83172222 | 7.87 | |
| 22.6 | 1.6 | 0.092574259 | 12.83172222 | 8.88 | 8.957142857 |
| 22.8 | 2 | 0.096869761 | 17.78627778 | 15.06 | |
| 22.8 | 2 | 0.096869761 | 17.78627778 | 14.92 | |
| 22.8 | 2 | 0.096869761 | 17.78627778 | 12.99 | |

| | | | | | |
|------|-----|-------------|-------------|-------|-------------|
| 23 | 2 | 0.116656243 | 14.28438889 | 14.95 | |
| 23.1 | 2 | 0.116656243 | 14.28438889 | 14.98 | |
| 23.4 | 2 | 0.092284858 | 18.81202778 | 15.82 | |
| 23.5 | 2 | 0.092284858 | 18.81202778 | 15.8 | 14.93142857 |
| 23.8 | 2.3 | 0.104528099 | 25.31215278 | 20.53 | |
| 24 | 2.3 | 0.104528099 | 25.31215278 | 23.43 | |
| 24 | 2.3 | 0.104528099 | 25.31215278 | 22.04 | |
| 24.2 | 2.3 | 0.104528099 | 25.31215278 | 22.32 | |
| 24.2 | 2.3 | 0.104528099 | 25.31215278 | 22.02 | |
| 24.3 | 2.3 | 0.104528099 | 25.31215278 | 23.69 | |
| 24.3 | 2.3 | 0.104528099 | 25.31215278 | 22.49 | 22.36 |

Tiempos Estimados
Temperaturas: 19.1-24.3 [°C]

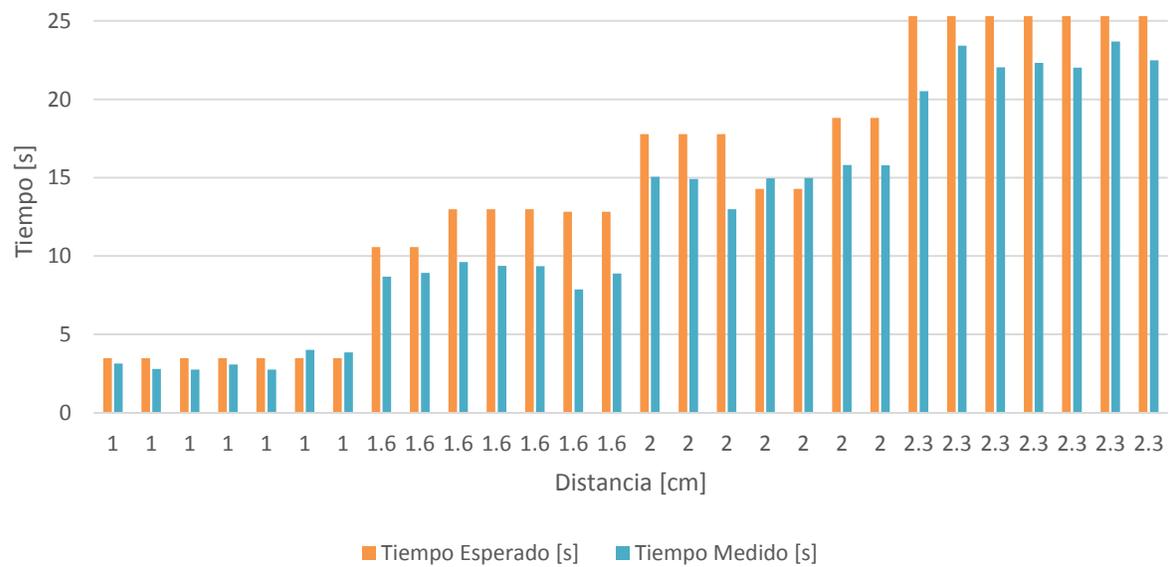


Figura 0.10 Comparación de tiempos_3

Tabla 0.17 Comparación de tiempos-Prueba 3

| Rango de temperatura de trabajo : | | | 17.9-25 °C | | |
|-----------------------------------|----------------|------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| Temp [°C] | Distancia [cm] | Velocidad [cm/s] | Tiempo Esperado [s] | Tiempo Medido [s] | Prom. Medido [s] |
| 25 | 1 | 0.07472678 | 7.591483333 | 4.22 | |
| 24.9 | 1 | 0.07472678 | 7.591483333 | 4.6 | |
| 24.5 | 1 | 0.104528099 | 3.776205556 | 4.27 | |
| 24.6 | 1 | 0.104528099 | 3.776205556 | 3.9 | |
| 24.3 | 1 | 0.104528099 | 3.776205556 | 3.8 | |
| 24.3 | 1 | 0.104528099 | 3.776205556 | 3.68 | 4.078333333 |
| 24.3 | 1.6 | 0.104528099 | 10.02616889 | 12.69 | |
| 24 | 1.6 | 0.104528099 | 10.02616889 | 12.78 | |
| 24.1 | 1.6 | 0.104528099 | 10.02616889 | 13.41 | |
| 23.8 | 1.6 | 0.104528099 | 10.02616889 | 13.38 | |
| 23.9 | 1.6 | 0.104528099 | 10.02616889 | 13.02 | |
| 23.6 | 1.6 | 0.092284858 | 12.05690222 | 12.96 | 13.04 |
| 23.4 | 2 | 0.092284858 | 17.03422778 | 20.86 | |
| 23.6 | 2 | 0.092284858 | 17.03422778 | 17.38 | |
| 23.4 | 2 | 0.092284858 | 17.03422778 | 19.34 | |
| 22.9 | 2 | 0.093739259 | 16.69797778 | 20.28 | |
| 23 | 2 | 0.116656243 | 12.50658889 | 18.6 | |
| 22.3 | 2 | 0.092574259 | 16.96647778 | 19.26 | 19.28666667 |
| 21.9 | 2.3 | 0.092574259 | 28.04761944 | 26.29 | |
| 21.9 | 2.3 | 0.092574259 | 28.04761944 | 26.11 | |
| 20.3 | 2.3 | 0.106519276 | 24.79503611 | 26.11 | |
| 19.8 | 2.3 | 0.106519276 | 24.79503611 | 28.68 | |
| 18.3 | 2.3 | 0.106519276 | 24.79503611 | 25.91 | |
| 17.9 | 2.3 | 0.106519276 | 24.79503611 | 25.2 | 26.38333333 |

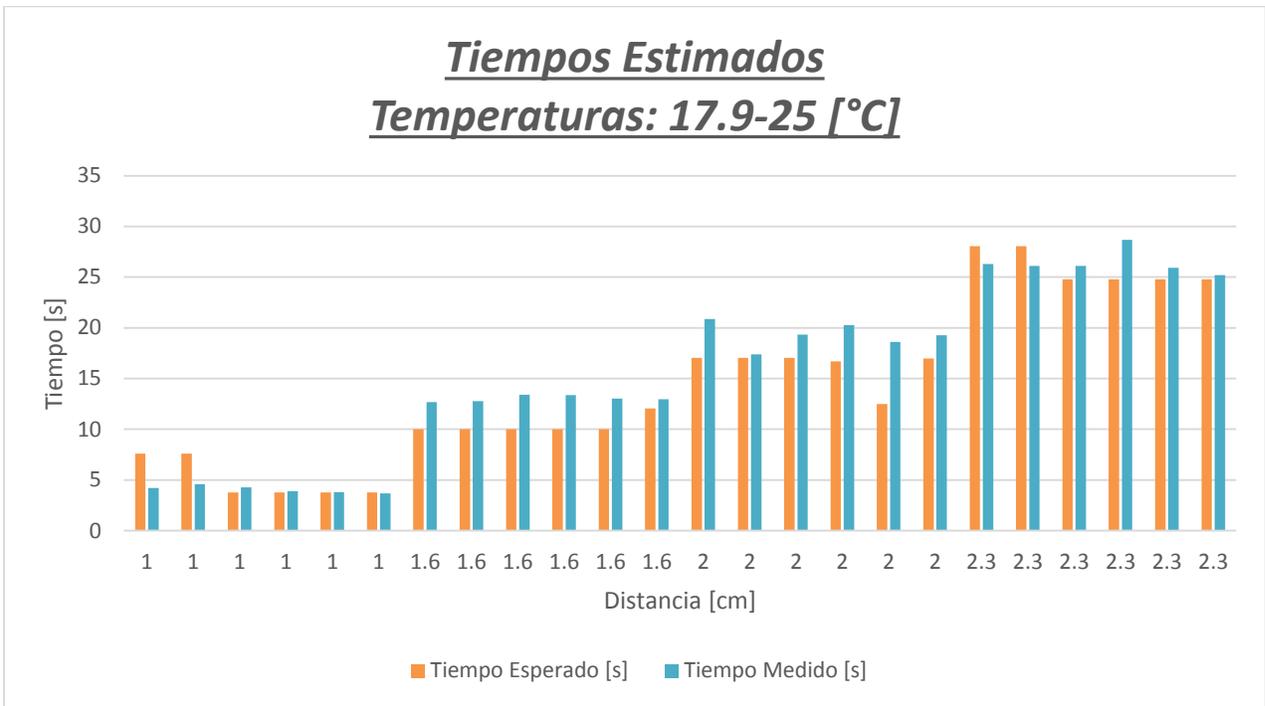


Figura 0.11 Comparación de tiempos_4

Tabla 0.18 Comparación de tiempos-Prueba 3

| Rango de temperatura de trabajo : | | | 20.4-24.9 °C | | |
|-----------------------------------|----------------|------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| Temp [°C] | Distancia [cm] | Velocidad [cm/s] | Tiempo Esperado [s] | Tiempo Medido [s] | Prom. Medido [s] |
| 24.3 | 1 | 0.104528099 | 1.935905556 | 1.98 | |
| 23.5 | 1 | 0.091728159 | 3.205113889 | 3.05 | |
| 23.6 | 1 | 0.092284858 | 3.205113889 | 2.71 | |
| 23.8 | 1 | 0.104528099 | 1.935905556 | 3.09 | |
| 23.8 | 1 | 0.104528099 | 1.935905556 | 2.82 | |
| 24 | 1 | 0.104528099 | 1.935905556 | 2.77 | 2.736666667 |
| 20.4 | 1.6 | 0.091728159 | 9.203444444 | 6.96 | |
| 20.8 | 1.6 | 0.091728159 | 9.203444444 | 7.36 | |
| 21.2 | 1.6 | 0.091728159 | 9.203444444 | 6.37 | |
| 21.3 | 1.6 | 0.091728159 | 9.203444444 | 6.37 | |
| 21.4 | 1.6 | 0.091728159 | 9.203444444 | 7.29 | |
| 21.9 | 1.6 | 0.092574259 | 9.044022222 | 7.27 | 6.936666667 |
| 22.1 | 2 | 0.092574259 | 17.35427778 | 10.18 | |
| 22.7 | 2 | 0.096869761 | 16.39627778 | 11.16 | |
| 23.2 | 2 | 0.092284858 | 17.42202778 | 11.57 | |
| 23.2 | 2 | 0.092284858 | 17.42202778 | 11.42 | |
| 23.3 | 2 | 0.092284858 | 17.42202778 | 11.51 | |
| 23.5 | 2 | 0.092284858 | 17.42202778 | 12.05 | 11.315 |

| | | | | | |
|------|-----|-------------|-------------|-------|-------------|
| 24.1 | 2.3 | 0.104528099 | 19.46085278 | 14.3 | |
| 24.2 | 2.3 | 0.104528099 | 19.46085278 | 15.69 | |
| 24.6 | 2.3 | 0.104528099 | 19.46085278 | 16.31 | |
| 24.8 | 2.3 | 0.07472678 | 28.23599167 | 16.33 | |
| 24.8 | 2.3 | 0.07472678 | 28.23599167 | 16.17 | |
| 24.9 | 2.3 | 0.07472678 | 28.23599167 | 16.53 | 15.88833333 |

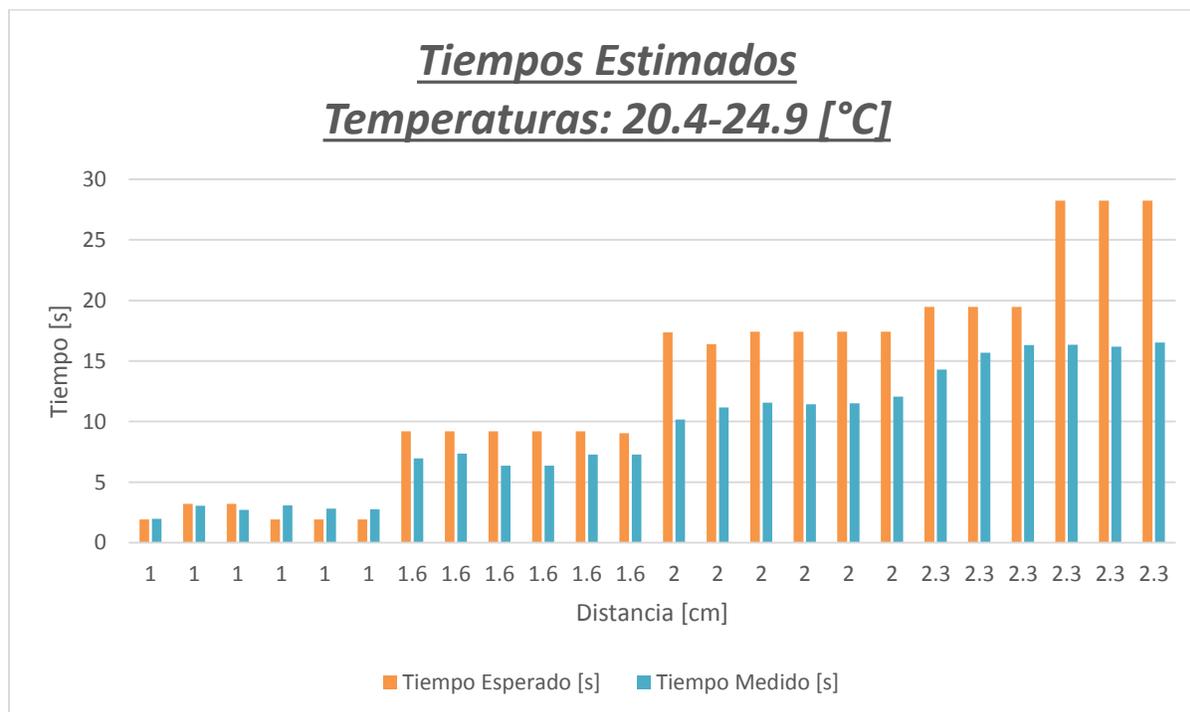


Figura 0.12 Comparación de tiempos_5

Tabla 0.19 Comparación de tiempos-Prueba 3

| Rango de temperatura de trabajo : | | | 22.9-25.4 °C | | |
|-----------------------------------|----------------|------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| Temp [°C] | Distancia [cm] | Velocidad [cm/s] | Tiempo Esperado [s] | Tiempo Medido [s] | Prom. Medido [s] |
| 25.4 | 1 | 0.104528099 | 2.618805556 | 3.5 | |
| 24.9 | 1 | 0.104528099 | 2.618805556 | 3.4 | |
| 25.3 | 1 | 0.104528099 | 2.618805556 | 3.46 | |
| 24.9 | 1 | 0.104528099 | 2.618805556 | 3.39 | |
| 25.2 | 1 | 0.104528099 | 2.618805556 | 3.6 | |
| 25 | 1 | 0.104528099 | 2.618805556 | 3.99 | 3.556666667 |
| 25 | 1.6 | 0.104528099 | 11.04408889 | 11.31 | |
| 24.6 | 1.6 | 0.104528099 | 11.04408889 | 10.85 | |
| 24.6 | 1.6 | 0.104528099 | 11.04408889 | 10.55 | |
| 24.6 | 1.6 | 0.104528099 | 11.04408889 | 11.25 | |
| 24.3 | 1.6 | 0.104528099 | 11.04408889 | 10.14 | |

| | | | | | |
|------|-----|-------------|-------------|-------|-------------|
| 24.2 | 1.6 | 0.104528099 | 11.04408889 | 11.51 | 10.935 |
| 23.9 | 2 | 0.104528099 | 11.59171111 | 14.34 | |
| 23.8 | 2 | 0.104528099 | 11.59171111 | 12.11 | |
| 23.4 | 2 | 0.092284858 | 14.13012778 | 14.7 | |
| 23.6 | 2 | 0.092284858 | 14.13012778 | 14.2 | |
| 23.1 | 2 | 0.092284858 | 14.13012778 | 12.85 | |
| 23 | 2 | 0.092284858 | 14.13012778 | 12.4 | 13.43333333 |
| 23.2 | 2.3 | 0.092284858 | 17.45173194 | 12.7 | |
| 23.7 | 2.3 | 0.092284858 | 17.45173194 | 14.76 | |
| 23.2 | 2.3 | 0.092284858 | 17.45173194 | 15.82 | |
| 23.1 | 2.3 | 0.092284858 | 17.45173194 | 16.54 | |
| 23.1 | 2.3 | 0.092284858 | 17.45173194 | 18.05 | |
| 22.9 | 2.3 | 0.092284858 | 17.45173194 | 17.42 | 15.88166667 |

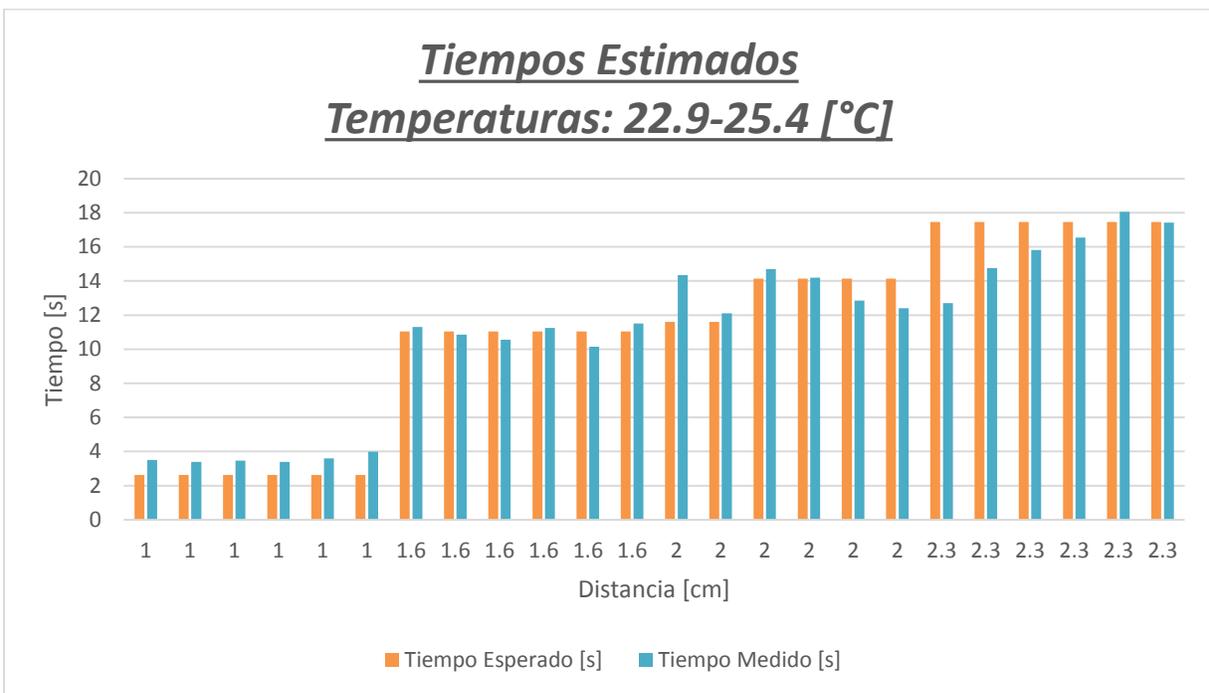


Figura 0.13 Comparación de tiempos_6

Tabla 0.20 Comparación de tiempos-Prueba 3

| Rango de temperatura de trabajo : | | | 22.9-25.5 °C | |
|-----------------------------------|----------------|------------------|---------------------|-------------------|
| Temp [°C] | Distancia [cm] | Velocidad [cm/s] | Tiempo Esperado [s] | Tiempo Medido [s] |
| 22.9 | 2.3 | 0.134790569 | 19.06350833 | 14.2 |
| 23.4 | 2.3 | 0.131794028 | 19.45147361 | 17.25 |
| 23.9 | 2.3 | 0.251071412 | 11.16074028 | 13.1 |
| 23.9 | 2.3 | 0.251071412 | 11.16074028 | 11.41 |
| 24.1 | 2.3 | 0.251071412 | 11.16074028 | 13.69 |
| 24.5 | 2.3 | 0.251071412 | 11.16074028 | 13.43 |
| 24.7 | 2.3 | 0.131794028 | 19.45147361 | 19.02 |
| 24.7 | 2.3 | 0.131794028 | 19.45147361 | 19.4 |
| 24.9 | 2.3 | 0.201090357 | 13.43764444 | 14.94 |
| 25.1 | 2.3 | 0.122984422 | 20.70155556 | 19.35 |
| 25.2 | 2.3 | 0.122984422 | 20.70155556 | 18.48 |
| 25.5 | 2.3 | 0.122984422 | 20.70155556 | 18.47 |

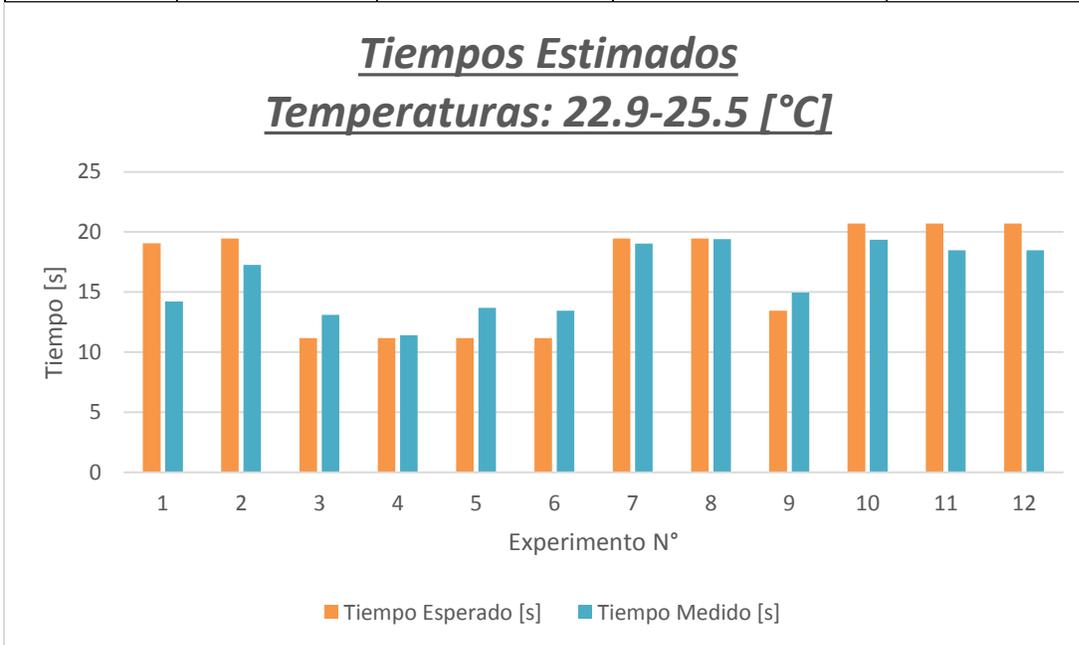


Figura 0.14 Comparación de tiempos_7

Tabla 0.21 Comparación de tiempos-Prueba 3

| Rango de temperatura de trabajo : | | | 19-25 °C | |
|-----------------------------------|----------------|------------------|---------------------|-------------------|
| Temp [°C] | Distancia [cm] | Velocidad [cm/s] | Tiempo Esperado [s] | Tiempo Medido [s] |
| 19 | 2.3 | 0.145453958 | 15.81256389 | 7.9 |
| 20.2 | 2.3 | 0.145453958 | 15.81256389 | 12.6 |
| 21 | 2.3 | 0.145453958 | 15.81256389 | 11.98 |
| 21.4 | 2.3 | 0.145453958 | 15.81256389 | 12.55 |

| | | | | |
|------|-----|-------------|-------------|-------|
| 21.7 | 2.3 | 0.145453958 | 15.81256389 | 13.51 |
| 21.7 | 2.3 | 0.145453958 | 15.81256389 | 12.52 |
| 22.1 | 2.3 | 0.145453958 | 15.81256389 | 14.24 |
| 22.2 | 2.3 | 0.145453958 | 15.81256389 | 14.48 |
| 22.5 | 2.3 | 0.132501031 | 17.35835556 | 17.66 |
| 23.2 | 2.3 | 0.131794028 | 17.45147361 | 15.36 |
| 23.3 | 2.3 | 0.131794028 | 17.45147361 | 15.7 |
| 23.3 | 2.3 | 0.131794028 | 17.45147361 | 15.12 |
| 23.7 | 2.3 | 0.131794028 | 17.45147361 | 16.76 |
| 23.9 | 2.3 | 0.131794028 | 17.45147361 | 17.44 |
| 24.1 | 2.3 | 0.131794028 | 17.45147361 | 16.63 |
| 24.5 | 2.3 | 0.131794028 | 17.45147361 | 17.67 |
| 24.6 | 2.3 | 0.131794028 | 17.45147361 | 17.02 |
| 24.6 | 2.3 | 0.131794028 | 17.45147361 | 17.25 |
| 25 | 2.3 | 0.122984422 | 18.70155556 | 17.28 |

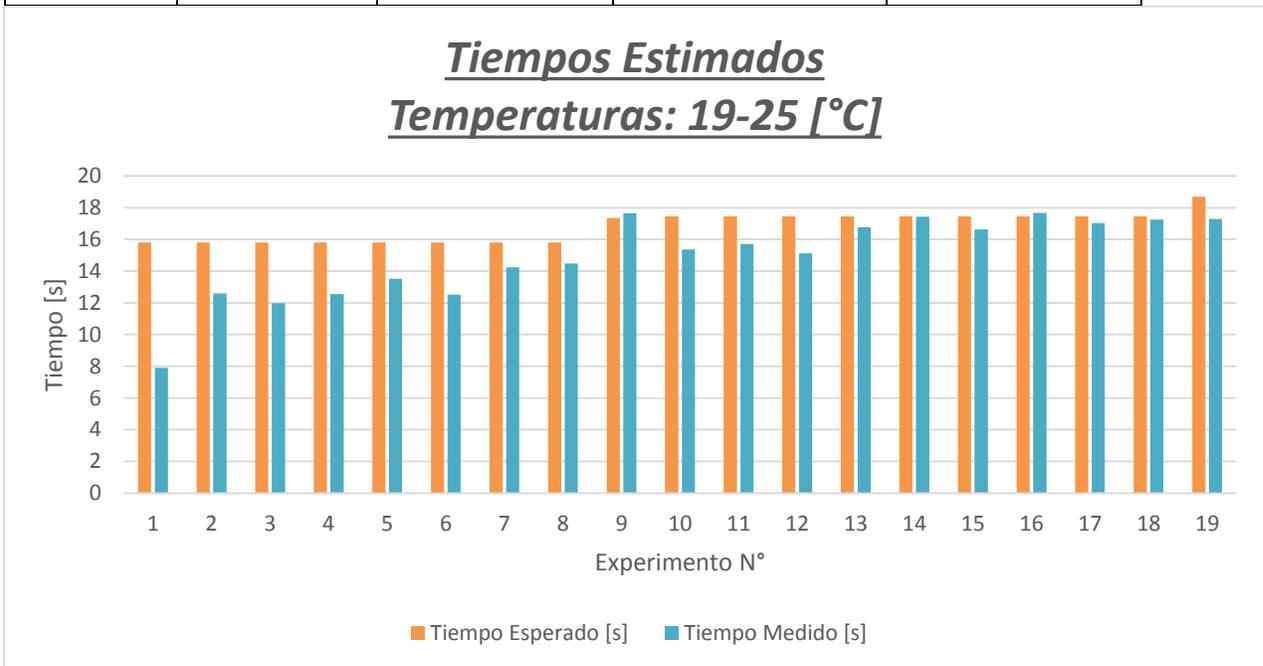


Figura 0.15 Comparación de tiempos_8

Tabla 0.22 Comparación de tiempos-Prueba 3

| Rango de temperatura de trabajo : | | | 20.2-25.9 °C | |
|-----------------------------------|----------------|------------------|---------------------|-------------------|
| Temp [°C] | Distancia [cm] | Velocidad [cm/s] | Tiempo Esperado [s] | Tiempo Medido [s] |
| 20.2 | 2.3 | 0.148452996 | 17.49311944 | 19.62 |
| 20.6 | 2.3 | 0.148452996 | 17.49311944 | 21.85 |
| 21.1 | 2.3 | 0.148452996 | 17.49311944 | 20.61 |
| 21.5 | 2.3 | 0.148452996 | 17.49311944 | 20.89 |
| 22 | 2.3 | 0.148452996 | 17.49311944 | 20.94 |

| | | | | |
|------|-----|-------------|-------------|-------|
| 22.6 | 2.3 | 0.132501031 | 19.35835556 | 20.85 |
| 23.1 | 2.3 | 0.131794028 | 19.45147361 | 21.12 |
| 23.6 | 2.3 | 0.131794028 | 19.45147361 | 21.56 |
| 24 | 2.3 | 0.131794028 | 19.45147361 | 20.91 |
| 24.3 | 2.3 | 0.131794028 | 19.45147361 | 21.12 |
| 24.5 | 2.3 | 0.131794028 | 19.45147361 | 19.51 |
| 24.6 | 2.3 | 0.131794028 | 19.45147361 | 19.48 |
| 24.7 | 2.3 | 0.131794028 | 19.45147361 | 20.1 |
| 25.1 | 2.3 | 0.122984422 | 20.70155556 | 21.09 |
| 25.2 | 2.3 | 0.122984422 | 20.70155556 | 21.71 |
| 25.2 | 2.3 | 0.122984422 | 20.70155556 | 21.53 |
| 25.3 | 2.3 | 0.122984422 | 20.70155556 | 21.81 |
| 25.7 | 2.3 | 0.122984422 | 20.70155556 | 22.3 |
| 25.9 | 2.3 | 0.122984422 | 20.70155556 | 21.5 |

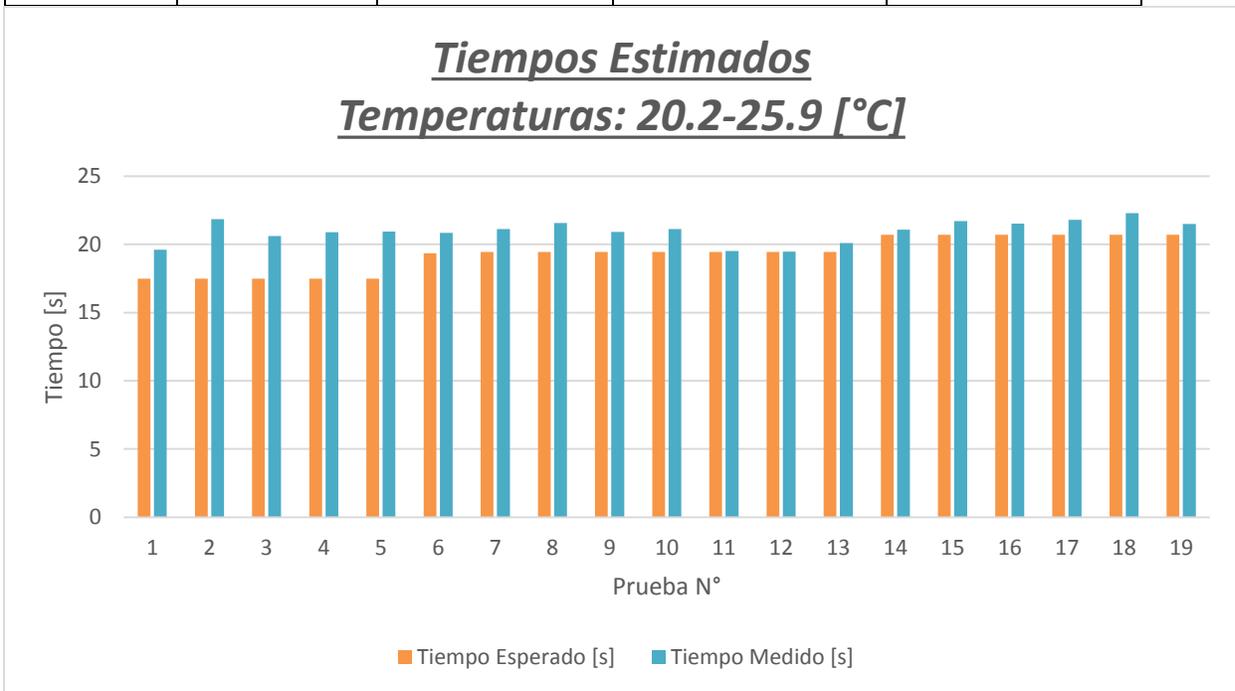


Figura 0.16 Comparación de tiempos_9

Bibliografía

- A. Martín Nogueras, J. L. (Enero de 1999). Fases de la marcha humana. *Revista Iberoamericana Fisioterapia y Kinesiología*, 2(1), 44-49. Obtenido de <http://www.elsevier.es/es-revista-revista-iberoamericana-fisioterapia-kinesiologia-176-articulo-fases-marcha-humana-13012714>
- Actimat. (2009). *Actimat*. Obtenido de Materiales inteligentes - Magnetoreológicos: <http://www.actimat.es/web/magnetoreologicos.asp>
- American Orthopaedic Foot & Ankle Society. (2017). *American Orthopaedic Foot & Ankle Society*. Obtenido de ¿Qué son las prótesis?: <http://www.aofas.org/footcaremd/espanol/Pages/Qu%C3%A9-Son-Las-Pr%C3%B3tesis.aspx>
- Autingo. (28 de Marzo de 2016). *Diferencias entre amortiguadores de gas y aceite*. Obtenido de <http://blog.autingo.es/diferencias-entre-amortiguadores-de-gas-y-aceite/>
- Beltrán, E. L. (Noviembre de 2004). Electrogoniómetro con dispositivo de realimentación para electroestimulación controlada. (J. M. García, Ed.) *Tecnología y Desarrollo*, II, 2. Recuperado el 16 de Febrero de 2017, de <http://www.uax.es/publicacion/electrogoniometro-como-dispositivo-de-realimentacion-biofeedback-para.pdf>
- Consumer, E. (8 de Enero de 2007). *Eroski Consumer*. Obtenido de El amortiguador reológico: http://www.consumer.es/web/es/motor/mantenimiento_automovil/2007/01/08/158772.php
- Cupich, M. R. (Julio-Diciembre de 1998). Amortiguadores magnetoreológicos. *Ingenierías*, 1(2).
- Dispositivos lógicos programables*. (4 de enero de 2013). Obtenido de Microcontroladores: http://perso.wanadoo.es/pictob/microcr.htm#_que_microcontrolador_emplear_
- Dyke, e. a. (1996). *Magnetorheological Dampers in Civil Structures*. Obtenido de Modeling and control of magnetorheological: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/5/5/006/pdf>
- Fisioterapia*. (19 de Septiembre de 2015). Recuperado el Marzo de 2017, de Blog para fisioterapeutas: <http://fisioterapia.blogspot.mx/2015/09/todo-sobre-el-centro-de-gravedad-en-el.html>
- Garza, M. C. (2017). Amortiguador magnetoreológico. *Revista de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León*, 50-54. Obtenido de ingenierias.uanl.mx/2/pdf/2_Miguel_Cupich_et_al_Amortiguadores.pdf
- Gorrotxategi, A. (1996). Movimientos globales de la rodilla. En A. Gorrotxategi, *El movimiento humano (bases anatómo-fisiológicas)* (págs. 43-44). Madrid: Gymnos.
- Gowitzke, B. A. (25 de Marzo de 2006). Ejes articulares y grados de libertad. En B. A. Miner, & Á. d. mecánica (Ed.), *El cuerpo y sus movimientos bases cinéticas* (págs. 20-23). Barcelona: Paidotribo. Obtenido de GLOSARIO: GRADOS DE LIBERTAD Y ECUACION DE GRÜBLER.

- Hernandez, G. (29 de Junio de 2016). *Doctor auto*. Obtenido de Ventajas y desventajas de los amortiguadores de gas: <http://www.doctorauto.com.mx/2016/06/29/ventajas-y-desventajas-de-los-amortiguadores-de-gas/>
- Hispavista. (s.f.). *galeon.com/Hispavista*. Obtenido de Microcontrolador: <http://microcontroladores-e.galeon.com/>
- Ibrahim, D. (2002). *Microcontroller-based temperature monitoring and control*. Oxford: Linacre House.
- Jiménez, R. E. (2002). *Control Semiactivo de Estructuras Civiles utilizanod amortiguadores magneto-reológicos*. Ciudad de México.
- Juárez., F. (2014). *Apuntes para la investigación en salud*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autonoma de México.
- Laurentino, V. (11 de Marzo de 2011). *WordPress.com*. Obtenido de Prótesis Pasiva de Rodilla, Estado del Arte.: <https://biomecanica2011.wordpress.com/2011/03/03/protesis-pasiva-de-rodilla-estado-del-arte/>
- LORD, C. (2015). *MAGNETO-RHEOLOGICAL (MR) STORE*. Obtenido de FAQ's -How much power can RD-1005-3 (MR Linear Damper) take?: <http://www.lordmrstore.com/faq>
- Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad. (2003). *Guia Descriptia de ortoprótesis*. Obtenido de Prótesis externas de miembro superior e inferior: <https://www.msssi.gob.es/profesionales/prestacionesSanitarias/CarteraDeServicios/ContenidoCS/6PrestacionOrtoprotesica/docs/GuiaDescriptivaOrtoprotesisTomo3.pdf>
- Nájera, J. A. (Octubre de 2007). *Diseño de una prótesis de rodilla externa para amputado transfemoral*. Ciudad de México, México.
- Nájera, J. A. (Octubre de 2013). *Diseño del control para una prótesis de rodilla tipo policéntrica (Tesis maestría)*. Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Obtenido de *Diseño del control para una prótesis de rodilla tipo policéntrica (Tesis maestría)*: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/6476/tesis.pdf?sequence=1>
- Nordin, M. (2012). Bases biomecánicas del sistema musculoesquelético. En V. H. Frankel, *Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System* (págs. 181-197). Philadelphia: Wolters Kluwer Health.
- Normando, T. T. (2016). *Diseño y caracterización de un amortiguador magnético seco*. Tesis licenciatura, Universidad Nacioal Autónoma de México, Facultad de ingeniería, Ciudad de México. Obtenido de <http://132.248.9.195/ptd2016/mayo/104002951/Index.html>
- Ortoiberica. (2017). *Ortoiberica*. Obtenido de Rodillas: http://www.ortoiberica.com/ortopedia-protetica-exogena-ortetica/protetica-de-miembro-inferior/rodillas_55_1_ap.html

- Schlumberger. (2017). *Schlumberger*. Obtenido de modelo plástico de Bingham:
http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/b/bingham_plastic_model.aspx
- Segal, P. (1985). La rodilla. En M. J. Philippe Segal, *La rodilla* (pág. 12). Barcelona: Masson,s.a.
- Stengele, F. H. (14 de Mayo de 2008). Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana. Cholula, Puebla, México. Obtenido de
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/hernandez_s_f/capitulo3.pdf
- System, E. T. (2017). *EAC training system*. (E. A. Casado, Editor) Recuperado el 25 de Marzo de 2017, de ¿Conoces los planos de movimiento?: <http://eacsystem.es/conoces-los-planos-de-movimiento/>
- Ulrich, K. T. (2013). Diseño y desarrollo de productos. En K. T. Ulrich. McGraw-Hill.
- Vázquez, V. D. (4 de Marzo de 2014). *Academia Nacional de Medicina en México*. Obtenido de Los amputados, un reto para el estado:
http://www.anmm.org.mx/actas2015/Acta_SO04032015.pdf