



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

TEMA

**“DISEÑO DEL SUMINISTRO DE ENERGÍA PARA UNA
PRÓTESIS BIOMEATRÓNICA DE RODILLA APROVECHANDO
LA ENERGÍA MECÁNICA”.**

Autor: Andrés Edir Peralta Pozo

Director: Ing. Diego Ortiz

IBARRA - ECUADOR

2017



**UNIVERSIDAD TÉCNICA
DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100276157-3		
APELLIDOS Y NOMBRES:	PERALTA POZO ANDRÉS EDIR		
DIRECCIÓN:	LA CANDELARIA, CAPITÁN JOSÉ ESPINOZA DE LOS MONTEROS, 6-78 Y SUCRE		
EMAIL:	andresperaltapozo@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:	062650431	TELÉFONO MÓVIL:	0994228039

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	DISEÑO DEL SUMINISTRO DE ENERGÍA PARA UNA PRÓTESIS BIOMEATRÓNICA DE RODILLA APROVECHANDO LA ENERGÍA MECÁNICA
AUTOR:	PERALTA POZO ANDRÉS EDIR
FECHA:	22-02-2017
PROGRAMA:	PREGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERÍA MECATRÓNICA
ASESOR /DIRECTOR:	ING. DIEGO ORTIZ

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, ANDRÉS EDIR PERALTA POZO, con cédula de identidad Nro. 1002761573, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

3. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 22 días del mes de febrero de 2017

EL AUTOR:



(Firma).....

Nombre: Andrés Edir Peralta Pozo



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR
DEL TRABAJO DE GRADO**

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, Andrés Edir Peralta Pozo, con cédula de identidad Nro. 100276157-3, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor de la obra o trabajo de grado denominado: “Diseño del suministro de energía para una prótesis biomecánica de rodilla aprovechando la energía mecánica”, que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, a los 22 días del mes de febrero de 2017

Firma:

Nombre: Andrés Edir Peralta Pozo

Cedula: 100276157-3

DECLARACIÓN

Yo, Andrés Edir Peralta Pozo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; y que este no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo el derecho de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Técnica del Norte, según lo establecido por las leyes de Propiedad Intelectual, Reglamentos y Normatividad vigente de la Universidad Técnica del Norte.

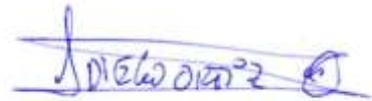


.....
Andrés Edir Peralta Pozo

C.I. 100276157-3

CERTIFICACIÓN

Certifico, que el proyecto de titulación denominado “DISEÑO DEL SUMINISTRO DE ENERGÍA PARA UNA PRÓTESIS BIOMECASTRÓNICA DE RODILLA APROVECHANDO LA ENERGÍA MECÁNICA” fue desarrollado por Andrés Edir Peralta Pozo, bajo mi supervisión para la obtención del título de Ingeniería Mecatrónica.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Diego Ortiz', with a circular mark at the end.

Ing. Diego Ortiz

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento a todas las personas que fueron parte de mi vida universitaria que de una u otra manera me ayudaron a seguir adelante y culminar esta etapa de mi vida.

A la Universidad Técnica del Norte en la cual pude obtener los conocimientos y valores para el desarrollo de mi vida profesional.

A cada docente que me brindo sus conocimientos e impartió la ciencia y la técnica en mi para lograr los objetivos propuestos.

Andrés Edir Peralta Pozo

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico de manera especial a mis padres Nelson y Piedad, ya que sin su gran apoyo, amor y comprensión no hubiera logrado cumplir esta meta, A mi hermana Sandra que gracias a sus conocimientos y el gran ejemplo de lucha y salir adelante ante las adversidades ha sido un pilar en mi vida, A mi princesa mi sobrinita Alisson que desde su llegada me brindo un motivo más de superación y empuje ante la vida, A mis tres viejitas que aunque ya no están siempre fueron mis grandes apoyos, a la persona que me brindo su comprensión durante mucho tiempo Alejandra y a mis eternos amigos Diego, Pablo B, Pablo O, Wilson, Nelson, David, Eduardo, Karen, Fernando, Jorge, Hugo y Ricardo que siempre han estado presentes en las buenas y malas.

Andrés Edir Peralta Pozo

ÍNDICE GENERAL

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN	ii
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	iv
DECLARACIÓN.....	v
CERTIFICACIÓN	vi
AGRADECIMIENTO	vii
DEDICATORIA	viii
ÍNDICE GENERAL.....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	xv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xviii
ÍNDICE DE ECUACIONES	xix
RESUMEN	xxi
ABSTRACT.....	xxii
CAPÍTULO I.....	1
EL PROBLEMA	1
1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivo Específico.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN	2
1.4. ALCANCE	4
1.5. LIMITACIONES	4
CAPÍTULO II.....	5
FUNDAMENTO TEÓRICO.....	5
2.1. INTRODUCCIÓN	5
2.2. LA ENERGÍA.....	5

2.2.1. Perdida de Energía.	5
2.2.2. Energía Potencial y Cinética.	5
2.2.3. Mecanismos para la obtención de energía en el ser humano	6
2.2.3.1. Mochila de captación de energía.....	6
2.2.3.2. Vigor impacto	7
2.2.3.3. Redes poliméricas interpenetrantes	7
2.2.3.4. Dispositivos Piezoeléctricos	8
2.2.3.5. Sudor Corporal	9
2.2.3.6. Ropa Generadora de energía.....	9
2.2.3.7. Ropa que convierte la luz en energía.....	10
2.3. GENERADOR ELÉCTRICO.....	11
2.3.1. Inducción Electromagnética.	11
2.3.2. Partes de un Generador.	11
2.3.3. Tipos de Generadores (Dinamo, Alternador).....	12
2.3.4. Funcionamiento básico de un generador	12
2.4. ENGRANAJES.....	13
2.4.1. Tipos de Engranajes.....	14
2.4.2. Engranajes de Dientes Rectos	14
2.4.3. Elementos de los engranajes rectos	15
2.4.4. Ventajas, Inconvenientes y Aplicaciones de los Engranajes Rectos.....	16
2.5. TREN DE ENGRANAJES	17
2.6. MATERIALES EMPLEADOS	17
2.6.1. Materiales metálicos.....	17
2.6.2. Materiales no metálicos.....	19
2.6.3. Selección de material mediante densidad resistencia.....	20
2.7. LA BATERÍA.....	20
2.7.1. Partes de una Batería.....	21

2.7.2. Tipos de Células.....	21
2.7.3. Metodologías usadas para carga de baterías	22
2.8. SÍNTESIS DEL CAPÍTULO	24
CAPÍTULO III	25
LOCOMOCIÓN HUMANA Y SELECCIÓN DE ARTICULACIÓN	25
3.1. ANÁLISIS BIOMECÁNICO DE LAS ARTICULACIONES.....	25
3.1.1. Biomecánica del Codo.....	25
3.1.2. Biomecánica del Hombro	26
3.1.3. Biomecánica de los dedos de la mano	27
3.1.4. Biomecánica de la Rodilla	27
3.2. JUSTIFICACIÓN DE LA ARTICULACIÓN DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA	28
3.2.1. El Codo.....	28
3.2.2. El Hombro	28
3.2.3. Los Dedos	28
3.2.4. La Articulación Óptima (Rodilla)	29
3.3. ANATOMÍA, FISIOLOGÍA Y BIOMECÁNICA DE LA RODILLA	29
3.3.1. Anatomía y fisiología de rodilla.....	29
3.3.2. Ejes principales y planos de referencia.	30
3.3.3. Los Huesos	31
3.3.4. Meniscos	32
3.3.5. Ligamentos.....	33
3.3.6. Músculos y Tendones.....	33
3.3.7. Cinemática de la Rodilla	34
3.3.8. Movimientos	35
3.3.9. Flexión y Extensión	36
3.3.10. Rotación	37

3.3.11. Cinética de la Rodilla.....	37
3.3.12. Desviaciones varizantes.....	37
3.3.13. Compresión frontal.....	38
3.3.14. Cizallamientos.....	38
3.4. LA MARCHA HUMANA.....	38
3.4.1. Fases del ciclo de la marcha normal.....	38
3.4.2. Parámetros de la marcha.....	39
3.4.3. El centro de gravedad durante la marcha.....	39
3.4.4. Características determinantes de la marcha.....	40
3.5. VELOCIDAD ANGULAR DE RODILLA DURANTE LA MARCHA.....	41
3.6. SÍNTESIS DEL CAPÍTULO.....	42
CAPÍTULO IV.....	43
DISEÑO DEL GENERADOR.....	43
4.1. DISEÑO MECÁNICO.....	43
4.1.1. Condiciones iniciales de diseño.....	43
4.1.2. Relación de transmisión.....	45
4.1.3. Diseño de engranajes.....	47
4.1.4. Síntesis de cálculos de diseño de engranes y piñones.....	57
4.1.5. Análisis en el tren de engranajes.....	58
4.1.6. Síntesis cálculos del tren de engranajes.....	68
4.1.7. Sistema racha.....	68
4.1.8. Carcasa y placa de sujeción.....	72
4.1.9. Sistema de sujeción.....	73
4.1.10. Ejes de transmisión.....	73
4.1.11. Sistema mecánico recolector de energía mecánica.....	74
4.2. DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO.....	75
4.2.1. El generador.....	75

4.2.2. Circuito de acople del generador a la salida.....	76
4.2.3. Circuito de carga de batería.	77
4.2.4. Batería.....	77
4.3. MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA	78
4.3.1. Revoluciones de Ingreso al Generador.	78
4.3.2. Torque de Entrada al Generador.....	79
4.3.3. Potencia Mecánica de la Rodilla y Entrada al Generador	79
4.3.4. Modelo matemático del generador.	80
4.3.5. Modelo matemático del tren de engranajes.....	85
4.3.6. Modelo matemático del suministro de energía para una prótesis biomecatrónica de rodilla aprovechando la energía mecánica.....	87
CAPÍTULO V.....	88
PRUEBAS Y RESULTADOS.....	88
5.1. OBJETIVOS DE LA PRUEBA.	88
5.2. PRUEBA MECÁNICA.....	88
5.2.1. Análisis mediante software.....	88
5.2.2. Engranaje del tren.	88
5.2.3. Piñón.	90
5.3. PRUEBAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA POR SOFTWARE.	92
5.3.1. Generación de energía en un paso	93
RESULTADOS.....	95
CAPÍTULO VI.....	96
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
CONCLUSIONES.....	96
RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES	98
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	99
BIBLIOGRAFÍA	100

ANEXOS	103
ANEXOS A: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE MATERIALES.....	103
ANEXOS B: HOJAS DE DATOS DEL GENERADOR.....	111
ANEXOS C: PROTOTIPO.....	112
PLANOS DEL DISEÑO MECÁNICO.....	113

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

CAPÍTULO II	5
Figura 2.1. Mochila Cosechadora.....	6
Figura 2.2 Sistema de impacto en el talón	7
Figura 2.3 Dispositivo electroelastometro	8
Figura 2.4 Dispositivos piezoeléctricos en una plantilla	8
Figura 2.5 Calcomanía generadora de energía.....	9
Figura 2.6 Camiseta generadora de energía.....	10
Figura 2.7. Fibras textiles, Mochila y cascos captadores de radiación solar	10
Figura 2.8. Generador Eléctrico despiece	11
Figura 2.9 Estator y rotor de un generador.....	12
Figura 2.10 Funcionamiento de un Generador.....	13
Figura 2.11 Engranajes	13
Figura 2.12 Nomenclatura de un engranaje.....	16
Figura 2.13 Reloj de bolsillo con engranajes rectos	16
Figura 2.14 Tren de Engranajes.....	17
Figura 2.15 Diagrama densidad vs resistencia.....	20
Figura 2.16 Batería y sus partes	21
CAPÍTULO III	25
Figura 3.1 Movimientos del codo.....	26

Figura 3.2 Movimientos del hombro	27
Figura 3.3 Movimientos de los Dedos	27
Figura 3.4 Ejes Principales de Referencia (Solsona, 2006)	30
Figura 3.5 Plano Transversal	31
Figura 3.6 Huesos de la rodilla.....	32
Figura 3.7 Meniscos	32
Figura 3.8 Ligamentos.....	33
Figura 3.9 Ligamentos Músculos y Tendones	34
Figura 3.10 Cinemática de la Rodilla.....	34
Figura 3.11 Valgus Fisiológico	35
Figura 3.12 Movimiento de Flexión y Extensión.....	36
Figura 3.13 Rotación de la Rodilla	37
Figura 3.14 Marcha normal	39
Figura 3.15 Marcha normal y sus ángulos	41
CAPÍTULO IV.....	43
Figura 4.1 Generador de energía mediante la marcha humana.....	43
Figura 4.2 Piñón de Acople y Piñón del Tren de Engranajes	50
Figura 4.3 Engrane del Tren de Engranajes y Racha	54
Figura 4.4 Diagrama de cuerpo libre piñón engranaje	58
Figura 4.5 Diagrama de cuerpo libre engranaje	58
Figura 4.6 Interferencia del sistema en forma gráfica	59
Figura 4.7 Engrane Transmisor de Fuerza.....	69
Figura 4.8 Muelle de torsión	70
Figura 4.9 Acople transmisor.....	70
Figura 4.10 Sujeciones del Acople de transmisión y Palanca	71
Figura 4.11 Pin de Sujeción	71
Figura 4.12 Palanca de acople a la rodilla	72

Figura 4.13 Carcasa y placa de sujeción	73
Figura 4.14 Sujeción	73
Figura 4.15 Ejes: Palanca Racha y Tren de engranes	74
Figura 4.16 Sistema Mecánico y sus partes.....	75
Figura 4.17 Generador Mabuchi Motor	76
Figura 4.18 Circuito Acople Generador Salida	76
Figura 4.19 Circuito de Carga	77
Figura 4.20 Batería.....	78
Figura 4.21 Motor y Generador DC para pruebas	80
Figura 4.22 Conexiones eléctricas driver L293D, myDAQ, motor y generador	81
Figura 4.23 RPM de Entrada Vs Voltaje Generado	81
Figura 4.24 Entorno función “ident” de Matlab.	83
Figura 4.25 Señal de voltaje del generador.....	84
Figura 4.26 Entorno LabVIEW.....	85
Figura 4.27 Tren de engranajes	85
Figura 4.28 Modelo matemático del sistema	87
CAPÍTULO V.....	88
Figura 5.1 Mallado engranaje.....	89
Figura 5.2 Von Mises	89
Figura 5.3 Deformaciones	90
Figura 5.4 Mallado piñón.....	90
Figura 5.5 Análisis de Von Mises en el piñón.....	90
Figura 5.6 Análisis de desplazamiento en el piñón	91
Figura 5.7 ángulo de recolección	92
Figura 5.8 Voltaje vs RPM en un paso	93
Figura 5.9 Voltaje vs RPM tren de engranajes	94

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO II	5
Tabla 2.1 Síntesis capítulo 2	24
CAPÍTULO III	25
Tabla 3.1 Ángulos de Flexión y Extensión del codo	26
CAPÍTULO IV	43
Tabla 4.1 Datos generales para el diseño de piñones	47
Tabla 4.2. Datos Generales para el Diseño de Engranajes	51
Tabla 4.3. Resumen de cálculos de diseño y ensamblaje.....	57
Tabla 4.4. Factor Y de Lewis.....	60
Tabla 4.5. Propiedades mecánicas del Nylon	64
Tabla 4.6. Factores de Confiabilidad.....	66
Tabla 4.7. Resumen cálculos del tren de engranajes.....	68
Tabla 4.8. Datos de Muestreo	82
CAPÍTULO V	88
Tabla 5.1. RPM VS Voltaje.....	94

ÍNDICE DE ECUACIONES

CAPÍTULO III	25
Ecuación 3.1.Velocidad angular de la rodilla.....	41
CAPÍTULO IV	43
Ecuación 4.1.Relación de transmisión requerida por el sistema	45
Ecuación 4.2.Relación de transmisión piñón engrane.....	46
Ecuación 4.3.Número de relaciones de transmisión requeridas.....	46
Ecuación 4.4.Diámetro de paso (PD)	47
Ecuación 4.5.Altura de cabeza (ADD).....	47
Ecuación 4.6.Altura de pie (DED).....	48
Ecuación 4.7.Profundidad total (WD)	48
Ecuación 4.8.Holgura (CL)	48
Ecuación 4.9.Diámetro externo (OD)	48
Ecuación 4.10.Diámetro de raíz (RD).....	48
Ecuación 4.11.Circulo de base (BC)	49
Ecuación 4.12.Paso circular (CP).....	49
Ecuación 4.13.Espesor circular (T)	49
Ecuación 4.14.Espesor de cabeza de diente (ADDc).....	49
Ecuación 4.15.Profundidad de trabajo (WKG).....	50
Ecuación 4.16.Ángulo de dientes en grados	50
Ecuación 4.17.Diametro de paso (PD)	51
Ecuación 4.18.Altura de cabeza (ADD).....	51
Ecuación 4.19.Altura de pie (DED).....	51
Ecuación 4.20.Profundidad total (WD)	52
Ecuación 4.21.Holgura (CL)	52
Ecuación 4.22.Diámetro externo (OD)	52
Ecuación 4.23.Diámetro de raíz (RD).....	52
Ecuación 4.24.Circulo de base (BC)	52
Ecuación 4.25.Paso circular (CP).....	53
Ecuación 4.26.Espesor circular (T)	53
Ecuación 4.27.Espesor de cabeza de diente (ADDc).....	53
Ecuación 4.28.Profundidad de trabajo (WKG).....	53
Ecuación 4.29.Diente en grados	54

Ecuación 4.30. Distancia entre centros	54
Ecuación 4.31. Paso diametral.....	55
Ecuación 4.32. Relación de contacto	55
Ecuación 4.33. Radio externo del piñón.....	56
Ecuación 4.34. Radio externo del engranaje.....	56
Ecuación 4.35. Radio del círculo de base del piñón	56
Ecuación 4.36. Radio del círculo de base del engranaje.....	56
Ecuación 4.37. Relación de contacto	57
Ecuación 4.38. Velocidad línea de paso	59
Ecuación 4.39 Par transmitido.....	60
Ecuación 4.40. Esfuerzo AGMA.....	61
Ecuación 4.41. Factor dinámico	62
Ecuación 4.42. Factor de tamaño.....	62
Ecuación 4.43. Esfuerzo de contacto	63
Ecuación 4.44. Coeficiente elástico.....	64
Ecuación 4.45. Factor geométrico.....	65
Ecuación 4.46. Carga a flexión.....	67
Ecuación 4.47. Resistencia a picadura	67
Ecuación 4.48. Contacto permisible	67
Ecuación 4.49. Revoluciones de ingreso al generador	78
Ecuación 4.50. Torque de entrada al generador	79
Ecuación 4.51. Potencia mecánica	79
Ecuación 4.52. Primer eslabón.....	86
Ecuación 4.53. Segundo eslabón.....	86
Ecuación 4.54. Ecuación ampliada	86
Ecuación 4.55. Tercer eslabón.....	86
Ecuación 4.56. Ecuación ampliada final.....	86



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

RESUMEN

El presente trabajo describe el análisis biomecánico de la caminata humana, la estructura ósea y muscular de la pierna, así también el diseño simulación y modelamiento de un sistema para el suministro energético de elementos electrónicos de prótesis biomecánicas de rodilla, aprovechando la energía mecánica producida por la extremidad inferior.

La investigación tiene por objeto diseñar un dispositivo autónomo de fácil acceso para personas con discapacidad física, especialmente personas que usan prótesis biomecánicas o dependen de recarga de baterías para su funcionamiento. En la actualidad con el avance de la ciencia y la técnica se ha marcado la distribución y utilización de prótesis u otros tipos de accesorios médicos que permiten la movilidad de personas con amputaciones, sin embargo, estos equipos requieren de una carga eléctrica, siendo incómodo y tedioso, razón por la que el presente trabajo pretende brindar solución a esta problemática.

Los componentes mecánicos usados están diseñados para brindar comodidad y confort al usar el dispositivo, Los mismos están mecanizados en nylon bajo los espesores de diseño planteados, pero al ejecutar las pruebas se deterioraron y no fue posible en Ecuador mecanizar un nuevo tren de engranajes, con las características y condiciones calculadas, La falta equipo específico y los costos de fabricación fuera de nuestro entorno llevaron a desarrollar simulaciones mediante software y la determinación de un modelo matemático.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

ABSTRACT

The present work describes the biomechanical analysis of the human walk, the muscular and bone structure of the leg, as well as the design simulation and modeling of a system for the energetic supply of electronic elements of biomechanical knee prostheses, taking advantage of the mechanical energy produced by the lower extremity.

The research aims to design an autonomous device easily accessible for people with physical disabilities, especially people who use biomechanical prostheses, which rely on battery recharge for their operation. At present with the advance of science and technology has marked the distribution and use of prostheses or other types of medical accessories that allow the mobility of people with amputations, however, this equipment require an electric charge, which results Uncomfortable and tedious, reason for which the present work tries to offer solution to this problematic.

The mechanical components used are designed to provide comfort and comfort when using the device, they were machined in nylon under the proposed design thicknesses, but after several tests it was determined that in our environment it is not possible to manufacture these elements due to lack of specific equipment and specialized human talent, by which the operation was established under software simulation. The result of the work was the determination of the design as well as the mathematical modeling and simulation of the device.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

En el siguiente capítulo se describe el problema, en sí de la investigación, los objetivos a desarrollar, los alcances y la justificación de este trabajo.

1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

El ser humano por naturaleza es una máquina capaz de producir recursos y por consiguiente es una gran fuente de energía, prueba de ello las articulaciones de rodilla, codo, tobillo, dedos y muñeca que son articulaciones sumamente móviles, y de gran importancia en la obtención de energía.

En el medio actual según estudios publicados por la Organización Internacional de Energía Atómica el 50% del problema ambiental o calentamiento global es producido por la emisión artificial de dióxido de carbono (CO_2), la cual proviene en gran medida de la quema y utilización de combustibles fósiles; por esta razón se ha planteado en el mundo la reutilización de los recursos mediante la generación energías limpias. (Uzcátegui, 2008)

El impacto medioambiental por las fuentes de energía convencional ha llegado a generar problemas de gran contextura, produciéndose así las denominadas lluvias acidas las cuales deterioran y destruyen la vegetación del planeta, como también contribuyen a la aparición del efecto invernadero el cual pone en riesgo la salud humana, animal y vegetal (Ecologistas, 2007)

Las industrias dedicadas a la elaboración y mejoramiento de prótesis de rodilla, y sistemas Biónicos, se han visto en la necesidad de recurrir a fuentes de recarga eléctrica debido a razones de Economía, comodidad, bienestar integral, seguridad, libertad y autonomía de funcionamiento para sus dispositivos.

Por estas razones, la investigación logrará obtener una fuente de energía renovable la cual optimizará el funcionamiento de prótesis de alta tecnología,

capaces de auto recargarse mediante mecanismos biomecánicos, regeneradores de energía que aprovechen los movimientos naturales de nuestro cuerpo para captar energía limpia, económica, funcional y autosuficiente para desarrollar las actividades diarias con seguridad y eficacia.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Diseñar el suministro de energía para una prótesis biomecatrónica de rodilla aprovechando la energía mecánica.

1.2.2. Objetivo Específico

- Estudiar la Biomecánica de los movimientos de la rodilla, tobillo y pie.
- Analizar las estructuras y funcionamiento de mecanismos de auto recarga de energía en prótesis biomecánicas de rodilla.
- Identificar las ventajas y limitaciones de la producción de auto energía en estos procesos.
- Desarrollar la Simulación del diseño propuesto, mediante software específico
- Proponer y diseñar el sistema biomecatrónico para recarga de baterías de prótesis biomecánicas de rodilla.
- Elaborar planos del dispositivo para próximas investigaciones.

1.3. JUSTIFICACIÓN

En el *aspecto tecnológico*, es un estudio e investigación en la que se concentran conocimientos de electrónica, mecánica, física, biología y anatomía cuya finalidad es generar energía, para ser usada en prótesis biomecatrónicas contribuyendo así al mejoramiento de estos sistemas, tratando de igualar las capacidades naturales de los seres vivos, afectados por las dolorosas experiencias de la amputación ya sea por desempeño deportivo, laboral o de enfermedades desarrolladas por la edad.

Desde el punto de *vista técnico* al integrar sensores, procesadores, actuadores, y complejos algoritmos de control a una prótesis, se necesita que estos innovadores dispositivos sean energizados, para así logra sistemas protésicos eficientes y que abran nuevas oportunidades de vida normal a las personas afectadas.

Desde el punto de *vista sico-social*, los índices elevados de accidentes de tránsito, dejan personas con necesidad de utilizar soluciones inmediatas para suplir; su o sus miembros perdidos, pero debido a costos elevados de esta tecnología, se ven marginados y aislados en su mundo laboral y hasta familiar.

El generador de potencia para recarga de baterías de prótesis biomecánicas de rodilla, es un dispositivo innovador, porque mejora la calidad y las oportunidades de una vida normal a las personas con discapacidad, evitando estar atados a una toma convencional de energía para recargar sus dispositivos protésicos. Conjuntamente, su construcción aporta con la ideología de protección al medio ambiente, porque el producto llega a utilizar la energía que nuestro cuerpo produce y se desperdicia en la marcha diaria.

Técnicamente este tipo de prótesis biomecánicas y robóticas superan las bondades del uso de prótesis con funciones puramente estéticas. Con el diseño del dispositivo se logra dar un paso importante para la fabricación de prótesis más dinámicas y brinda la posibilidad de uso de energía limpia contribuyendo a la protección del ambiente.

Una de las características del generador de potencia para recarga de baterías de prótesis es permitir aumentar la vida útil de la batería logrando que la misma no se “descargue completamente (0%), porque esto conlleva a un efecto negativo y mientras más tiempo se mantenga así crea un desperfecto de carga”¹² .

Tomando en consideración que el dispositivo podrá cargar baterías de litio de 5 y 10 voltios, garantiza el suministro a sistemas internos de la prótesis de rodilla.

¹ http://www.eldefinido.cl/actualidad/mundo/1835/6_mitos_sobre_las_baterias_de_Litio/

² <http://bitelia.com/2012/05/6-recomendaciones-para-extender-la-vida-util-de-las-baterias-li-ion>

1.4. ALCANCE

Con esta investigación se abarca el estudio de la morfología funcional y descriptiva de la rodilla, específicamente los movimientos extensores, flexores y rotacionales, relacionándolos con las posibles formas de generación de energía eléctrica.

Se realiza el diseño del dispositivo el cual cumple las necesidades que se busca: fiabilidad, confort, resistencia, y eficiencia energética. Durante el proceso de diseño se monitorea la capacidad de tracción y ruptura del dispositivo.

Con esta investigación se persigue extender el concepto de energías limpias para mejorar el estilo de vida de las personas con algún tipo de discapacidad brindándoles una inserción en la vida cotidiana y como también la posibilidad de sentirse útiles e indispensables en la sociedad.

1.5. LIMITACIONES

- Maquinado de micro engranes del sistema mecánico
- Falta de centros de mecanizado adecuados para micro mecanismos.
- Disponibilidad de materiales apropiados para la fabricación.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN

Dentro de este capítulo se conocen los conceptos y definiciones básico-técnicas que permitan comprender el capítulo de diseño abordando conceptos como energía, fuentes de energía, generadores, baterías, ejes, materiales, metales, no metales, etc. los cual contribuye al desarrollo de conocimientos.

2.2. LA ENERGÍA

Para hablar de generación de energía es fundamental citar que la energía es la capacidad para producir trabajo, Es decir cualquier cuerpo o condición que permite efectuar algún trabajo, por ejemplo, las caídas de agua, el vapor del agua, los combustibles, y la corriente de aire. la energía no puede producirse o destruirse porque es una constante pero lo que si puede es transformar o cambiar de una forma a otra. (Pulido, 2012)

2.2.1. Perdida de Energía.

Cualquier transformación de energía no puede tener una eficiencia de 100% sino que parte de ella se pierde o se convierte en formas no deseadas de energía, como en el caminar diario se produce el sudor, se produce un rozamiento de la ropa, entre otras esto hace que esa energía no sea aprovechada, pero no se ha destruido, sino migrado a otra forma. (Pulido, 2012)

2.2.2. Energía Potencial y Cinética.

La energía potencial está en innumerables formas como los combustibles fósiles, una llanta inflada, un resorte comprimido, o un balón de futbol; En cualquiera de estos casos la materia no es convertida y por lo tanto es denominada como energía potencial o energía lista para el trabajo.

Un ejemplo aplicativo una batería cargada al 100% posee en su interior una energía potencial lista y dispuesta para su transformación, si se la conecta a un circuito inmediatamente se convierte en energía cinética. (Pulido, 2012).

2.2.3. Mecanismos para la obtención de energía en el ser humano

En la actualidad existen muchas investigaciones relacionadas a la captación de energía, principalmente a la capturar de la energía cinética que produce el movimiento del cuerpo humano, para mediante algún proceso o artefacto convertirla en electricidad.

2.2.3.1. Mochila de captación de energía

Este método logra capturar el movimiento de los pies mediante un par de cables independientes los cuales transmiten el movimiento a un generador eléctrico obteniendo, en una marcha modesta desde 0,5W hasta 7,4W. Cabe señalar que el modelo utiliza bandas poleas y cables de tensión, requiere un gran espacio y peso en la mochila dificultando el desarrollo normal de las actividades del ser humano. (Michael Shepertycky, Jun-Tian Zhang, Yan-Fei Liu, and Qingguo Li, 2013)

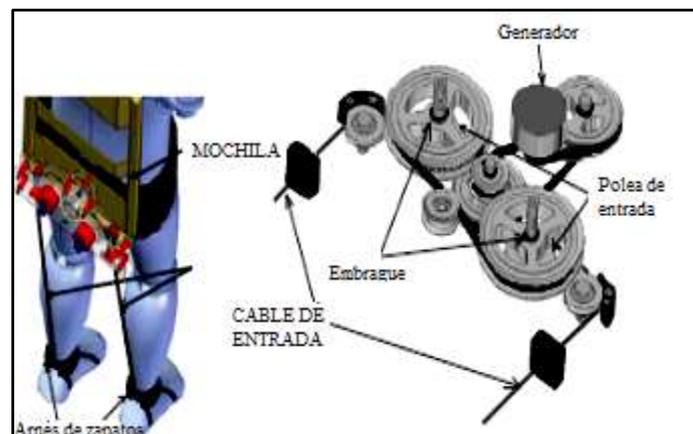


Figura 2.1. Mochila Cosechadora

Fuente: (Michael Shepertycky, Jun-Tian Zhang, Yan-Fei Liu, and Qingguo Li, 2013)

2.2.3.2. Vigor impacto

Este sistema se aloja en el talón de un zapato, consta de dos pequeños generadores, una caja de engranajes, una palanca de choque que al caminar y apoyar el talón al suelo logra generar 1.61 Watts y una potencia media de 58,1 mW a través de toda la locomoción. El principal problema del dispositivo es el confort al caminar por la dureza de los elementos metálicos, lo relevante es la poca notoriedad visual por su ubicación dentro del zapato. (Hayashida, 2000)



Figura 2.2 Sistema de impacto en el talón
Fuente: (Hayashida, 2000)

2.2.3.3. Redes poliméricas interpenetrantes

Este sistema consta de un polímero dieléctrico el cual al comprimirse estimula la generación eléctrica positiva y al descomprimirse desconecta la generación, pero da el impulso para el siguiente estímulo este sistema actúa de similar forma que un diafragma logrando generar una potencia máxima de 800mW dependiendo del tamaño de la red polimérica y el material constitutivo. (Soon Mok Haa, Il Seok Parkb, Michael Wisslerc, Ron Pelrined, Scott Stanfordd, Kwang J. Kimb,, 2008)

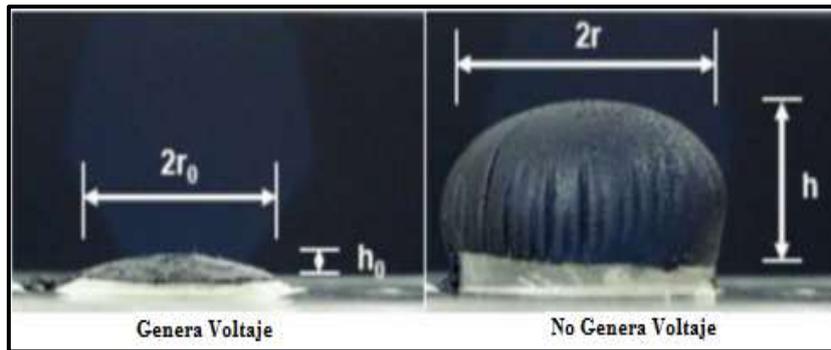


Figura 2.3 Dispositivo electroelastómetro

Fuente: (Soon Mok Haa, Il Seok Parkb, Michael Wisslerc, Ron Pelrined, Scott Stanfordd, Kwang J. Kimb,, 2008) Soon Mok Haa, Il Seok Parkb, Michael Wisslerc, Ron Pelrined, Scott Stanfordd, Kwang J. Kimb,,. (2008). High Electromechanical Performance of Electroelastomers Based on Interpenetrating Polymer Networks.

2.2.3.4. Dispositivos Piezoeléctricos

Estos sistemas generan una baja potencia eléctrica pero aun así llegan a producir hasta 0.8W de potencia eléctrica, generalmente son ubicados bajo la plantilla de un zapato siendo así casi imperceptibles, estudios recientes han logrado generar los llamados tapetes o pisos generadores de energía basados en estos dispositivos los cuales con el paso de las personas logran obtener una gran carga eléctrica por sus múltiples dispositivos, (Tapia, 2014)

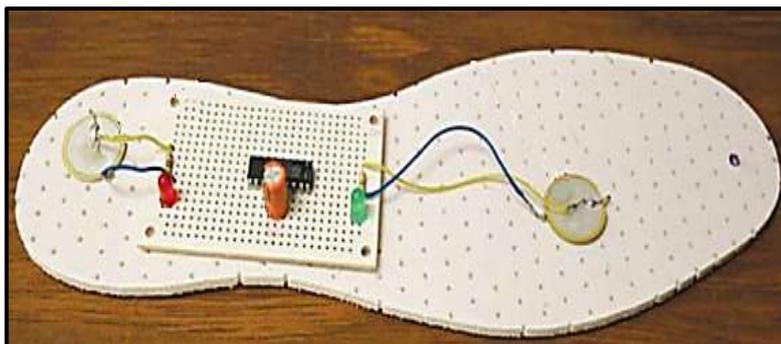


Figura 2.4 Dispositivos piezoeléctricos en una plantilla

Fuente: (Tapia, 2014) Tapia, A. (29 de 12 de 2014). *Constructor eléctrico*. Obtenido de <http://constructorelectrico.com/energia-que-emerge-al-paso/>.

2.2.3.5. Sudor Corporal

Se ha logrado crear una especie de adhesivo o calcomanía capaz de generar electricidad a partir del sudor humano, el dispositivo genera pequeñas corrientes eléctricas basadas en la detección del lactato que es un ácido excretado en la transpiración luego de una actividad física.

El mini generador tan solo entrega 70 micro vatios por centímetro cuadrado de piel, si se considera que las personas con poco habito de ejercicio son las que brindan mayor aporte de lactato, por sus condiciones corporales este dispositivo consigue una buena producción energética. (Cambre, 2014)



Figura 2.5 Calcomanía generadora de energía
Fuente: (Cambre, 2014)

2.2.3.6. Ropa Generadora de energía

A este tipo de ropa se le denomina como FIED (Flexible Integrated Energy Device), las cuales, mediante el rozamiento entre la piel y la camiseta, es canalizada la energía hacia una batería recargable integrada, o suministra energía a dispositivos electrónicos. Tiene el aspecto a cualquier camiseta corriente pero su gran aporte a la conservación del planeta por la energía limpia renovable que producen. (Csiro, 2007)



Figura 2.6 Camiseta generadora de energía
Fuente: (Csiro, 2007)

2.2.3.7. Ropa que convierte la luz en energía.

Las fibras solares textiles son altamente flexibles captan la radiación solar como cualquier panel solar y la convierte en energía eléctrica este tipo de fibra tiende a ser un gran aporte a la generación de energía limpia. (Pizarro, 2014)

Los mini paneles solares usados en filas militares tanto en mochilas y cascos captan la radiación solar y la convierten en energía, la cual recarga baterías de sistemas de comunicación e información. (Marina, 2014)



Figura 2.7. Fibras textiles, Mochila y cascos captadores de radiación solar
Fuente: (Marina, 2014), (Pizarro, 2014)

2.3. GENERADOR ELÉCTRICO

Un generador eléctrico no es más que un aparato capaz de transformar la energía potencial mecánica en energía cinética eléctrica, mediante una diferencia constante de cargas eléctricas. (Estefani, 2013)

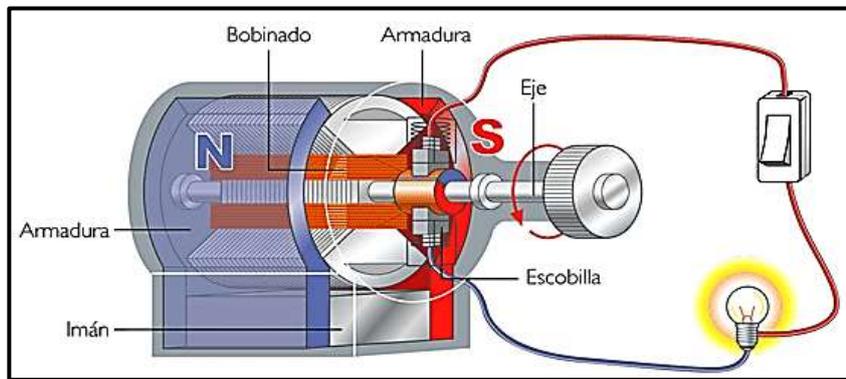


Figura 2.8. Generador Eléctrico despiece
Fuente: (Estefani, 2013)

2.3.1. Inducción Electromagnética.

Un generador responde a la ley principal de inducción establecida por Michael Faraday en la cual se establece que si un conductor eléctrico es girado a través de un campo magnético en este conductor se induce una corriente eléctrica, bajo este principio se establece la construcción de un generador (Estefani, 2013)

2.3.2. Partes de un Generador.

Los componentes principales de un generador son:

Estator.

La armadura, carcasa o cobertura es el llamado estator el cual acoge a las masas de alambres de cobre que conforman el circuito de inducción

Rotor.

El rotor contiene una bobina enrollada en el núcleo magnético la cual gira dentro del campo magnético producido por el estator ocasionando así que la ley

de inducción se cumpla y genere movimiento logrando mover una turbina o algún elemento mecánico. (Estefani, 2013)

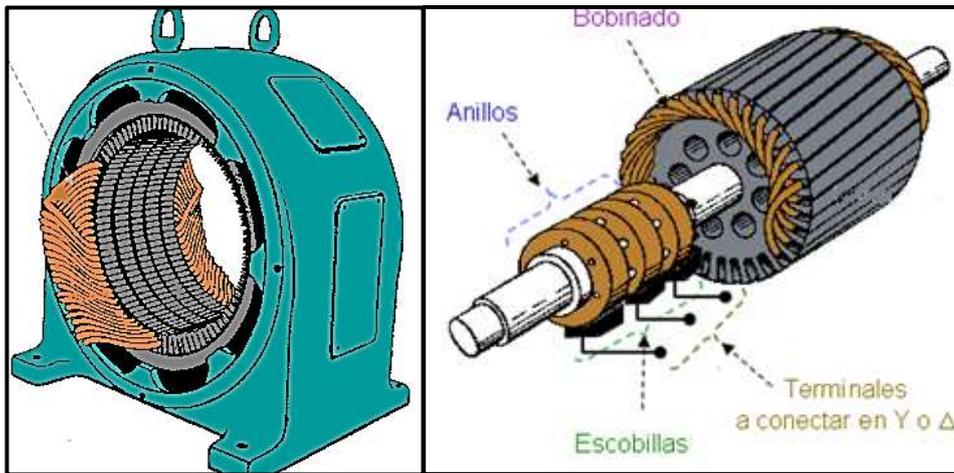


Figura 2.9 Estator y rotor de un generador.
Fuente: (Estefani, 2013)

2.3.3. Tipos de Generadores (Dinamo, Alternador)

Los alternadores son generadores que producen corriente alterna aprovechando que el elemento de inducción es el rotor y el inducido es el estator ejemplo de ello los generadores de las centrales eléctricas, las cuales transforman la energía mecánica en eléctrica alterna. En cambio, los dinamos generan corriente continua, pero su elemento inductor es el estator y el inducido el rotor, el ejemplo la luz de una bicicleta, la cual funciona a través del pedal. (Enel, 2014)

2.3.4. Funcionamiento básico de un generador

Si una fuerza mecánica mueve a grandes velocidades al rotor se induce una corriente en el estator y así se produce energía que una vez transformada será energía eléctrica.

Generalmente un generador rota entre 1000 a 10000 revoluciones por minuto llegando a producir corrientes de entre uno, dos o más amperios, capaces de alimentar un circuito electrónico o cargar una batería.

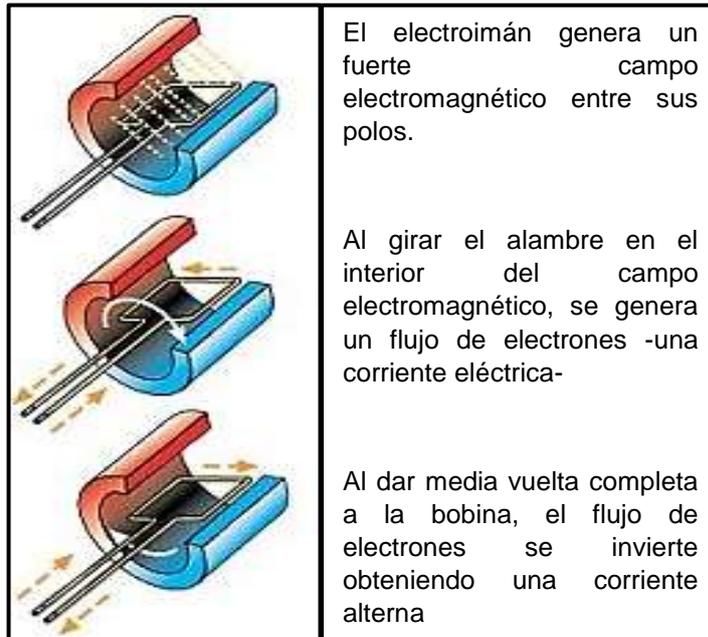


Figura 2.10 Funcionamiento de un Generador
Fuente: (Estefani, 2013)

2.4. ENGRANAJES

Los engranajes son mecanismos utilizados para transmitir la potencia de un componente a otro, dentro de una máquina o un dispositivo, un sistema de engranajes está dado por dos ruedas dentadas una más pequeña y otra más grande las mismas que se denominan piñón y corona, la principal ventaja de estos es que la transmisión de fuerza o energía es directa no necesita una banda y por ende no hay patinado el cual garantiza una excelente transmisión de movimiento. (Joseph Shigley , 2014)



Figura 2.11 Engranajes

2.4.1. Tipos de Engranajes.

Los engranajes se pueden clasificar por su dentado, por sus ejes, por su rotación y por condiciones especiales.

Ejes paralelos

- Cilíndricos de dientes rectos
- Cilíndricos de dientes helicoidales
- Doble helicoidales

Ejes perpendiculares

- Helicoidales cruzados
- Cónicos de dientes rectos
- Cónicos de dientes helicoidales
- Cónicos hipoides
- De rueda y tornillo sin fin

Por aplicaciones especiales

- Planetarios
- Interiores de cremallera

Por la forma de transmitir el movimiento

- Transmisión simple
- Transmisión con engranaje loco
- Transmisión compuesta.

Transmisión mediante cadena o polea dentada

- Mecanismo piñón cadena
- Polea dentada

2.4.2. Engranajes de Dientes Rectos

Los engranajes de dientes rectos son aquellos que sus dientes y ejes son paralelos. La unión de varios engranajes rectos da lugar a la formación de un tren de engranajes.

2.4.3. Elementos de los engranajes rectos

La terminología de los principales elementos de un engranaje de dientes rectos es:

- **Ángulo de presión [PA]:** Se define como el ángulo que va desde la línea de acción y la dirección de la velocidad en el punto de paso, estos ángulos han sido normalizados en 14.5, 20 y 25 grados.
- **Diámetro de Paso:** Es el diámetro de circunferencia imaginaria en la cual se grafican los dientes de un engrane.
- **Módulo [MDL]:** Es la longitud del diámetro de paso por diente.
- **Altura de Cabeza o Addendum [ADD]:** Es la distancia radial del círculo de paso a la parte superior del diente
- **Altura de Pie o Dedendum [DED]:** Es la distancia radial del círculo primitivo a la parte superior del diente.
- **Profundidad total [WD]:** Es la altura total del diente.
- **Holgura [CL]:** Se la reconoce como la distancia radial entre la parte inferior de un diente y la parte superior del diente conjugado.
- **Diámetro Externo [OD]:** Es el diámetro total del engranaje
- **Diámetro de Raíz [RD]:** Es el diámetro en la parte inferior el diente
- **Círculo Base [BC]:** Círculo donde se forma la curva de involuta del diente
- **Espesor Circular [T]:** Se define así al espesor de un diente o espacio medido en la circunferencia del diámetro de paso
- **Espesor de cabeza de Diente [ADDc]:** Es conocido como el espesor del diente corregido, es la distancia perpendicular de una cuerda a la circunferencia externa del diente
- **Profundidad de trabajo:** Es la profundidad de endentación de dos engranes y la suma de dos alturas de cabeza.

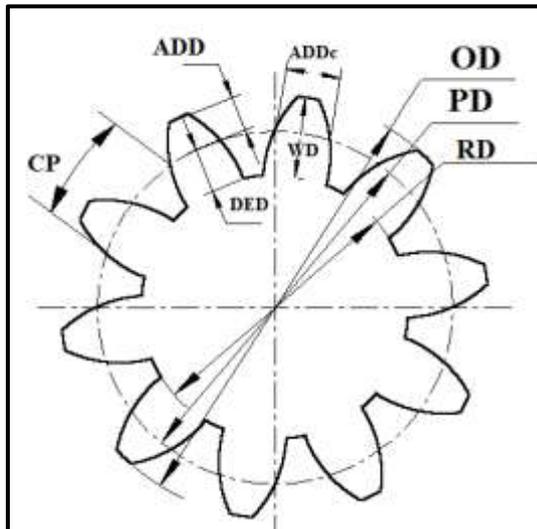


Figura 2.12 Nomenclatura de un engranaje
Fuente: (Diego, 2010)

2.4.4. Ventajas, Inconvenientes y Aplicaciones de los Engranajes Rectos

En los engranajes rectos se destaca como ventaja principal su fácil fabricación, pero a su vez tienen la desventaja de ser altamente ruidosos y producir muchas vibraciones. Generalmente se emplean en mecanismos en los que la potencia y el número de revoluciones es alto, algunas aplicaciones son el tren de engranajes de impresoras, cajas de reducción de velocidad, y hasta en relojes. (Mott, 2006)



Figura 2.13 Reloj de bolsillo con engranajes rectos

2.5. TREN DE ENGRANAJES

El tren de engranajes es la unión de varios engranajes rectos o helicoidales, capaces de transmitir el movimiento giratorio entre ejes, consiguiendo disminuir o aumentar velocidades, y torque, se lo usa también para invertir el giro de un motor.

Este tipo de sistemas consta de ruedas dentadas dobles en el mismo eje y tener diferente número de dientes. (CEJAROSU, 2005)

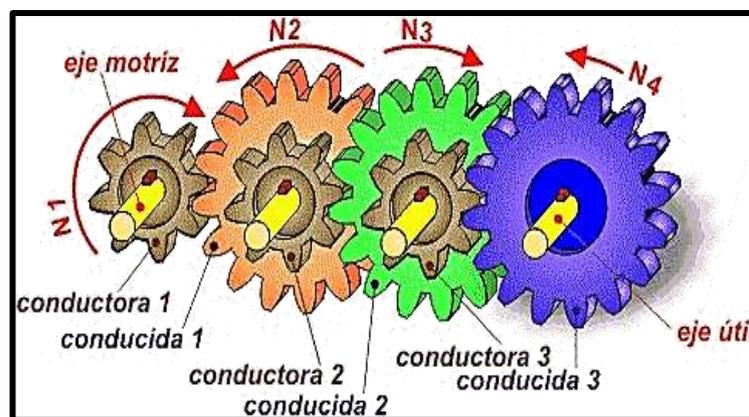


Figura 2.14 Tren de Engranajes
Fuente: (CEJAROSU, 2005)

2.6. MATERIALES EMPLEADOS

Para la fabricación de engranajes se emplean diversos materiales metálicos como el acero, aleaciones ligeras de aluminio o fundiciones y no metálicos como el teflón y el nylon. Sin embargo, se debe considerar las propiedades físicas del material tales como durabilidad, resistencia al desgaste, roturas, entre otras propiedades que los hacen confiables.

2.6.1. Materiales metálicos

La mayor parte de los minerales encontrados son metales, los cuales poseen características como conducción eléctrica, maleabilidad, ductilidad, conductividad térmica y más características propias de un metal, dentro de la

gama de metales en la tabla periódica podemos encontrar elementos líquidos como el mercurio y la gran mayoría sólidos como el hierro, el aluminio el calcio, titanio entre otros.

Los metales se caracterizan por tener la ionización baja, mismos que sufren la reacción química de la oxidación sea por su desarrollo en el ambiente o por alguna sustancia que acelere su reacción. Son usados para fines de construcción estructurales, fabricación de elementos como recipientes, joyería o simplemente un conductor eléctrico. (Vega, 2015)

Acero

El término acero sirve comúnmente para denominar a una mezcla de hierro y una cantidad de carbono del 0,03 % y el 2,14 %. Si la aleación posee una concentración de carbono mayor al 2,14 % se producen fundiciones que, en oposición al acero, son mucho más frágiles y no es posible forjarlas. Algunas propiedades de los aceros se encuentran en el *Anexo A*.

Aluminio

El aluminio es el tercer elemento común encontrado en la corteza terrestre. Los compuestos de aluminio forman el 8% de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas, de la vegetación y de los animales. El aluminio puro es un metal suave, blanco y de peso ligero, puede ser fuerte, ligero, dúctil y maleable así también es un excelente conductor del calor y de la electricidad. Algunas propiedades básicas del aluminio y sus aleaciones se encuentran en el *Anexo A*.

Hierro

Es un metal maleable, de color gris plateado con buenas propiedades magnéticas, extremadamente duro y denso, se encuentra en la naturaleza formando parte de numerosos minerales, como también en óxidos, y raramente en estado libre. Para obtener hierro en estado elemental, los óxidos se reducen con carbono y luego son sometido a un proceso de refinado para eliminar las impurezas presentes. Propiedades *Anexo A*.

2.6.2. Materiales no metálicos

Los no metales tienen características distintas a los metales, no son conductores de la temperatura, y la electricidad, no tienen aspectos lustrosos o brillantes, su punto de fusión son extremadamente inferiores con respecto a un metal y la principal desventaja es su fragilidad, aunque en casos excepcionales como el diamante su dureza es única. Actualmente los no metales se han convertido en una alternativa al uso de metales debido a su poco peso, su resistencia a la oxidación, y su maleabilidad para trabajos de manufactura. (Vega, 2015)

Polímeros

Los polímeros son macromoléculas generalmente orgánicas llamadas monómeros se clasifican en:

- Homopolimeros dentro de estos están los Polietilenglicol y las Siliconas,
- Copolimeros. Se pueden considerar a las Baquelitas, Poliésteres y Poliamidas.

Algunas características y propiedades en el *Anexo A*

Nylon o Poliamida 6

El nylon o también conocido como Poliamida, Ultramid B, Akulon F, Durethan o por sus siglas PA6 es uno de los materiales más interesantes utilizados en la ingeniería mecánica, debido a su constitución y sus características gozando de una gran tenacidad, resistencia, soporte a temperaturas moderadas, a cargas de impacto, brinda una baja oposición al rozamiento, gran resistencia a la fatiga, al choque, la alta resistencia a la rotura y flexión como también el poco ruido que produce al trabajar. Al ser un no metal no sufre con los choques atmosféricos. *Anexo A.* (Sanmetal, s.f.)

Acrílico

Termoplástico caracterizado por su dureza su transparencia y su finura en el acabado. Generalmente se lo puede encontrar en forma transparente, pero con procesos de pigmentación se lo ha podido obtener en variados colores, se

caracteriza por la alta resistencia a la polilla, aceites, productos químicos y la radiación solar, así también es fácil de lavar y posee una buena estabilidad del color y dimensión las características generales se encuentran en el *Anexo A*. (ULTRAPLAS, s.f.)

2.6.3. Selección de material mediante densidad resistencia

Para que el sistema no tenga peso excesivo se analiza mediante software el material idóneo para el propósito en la *figura 2.15* se considera todos los materiales de alta resistencia vs la densidad siendo el mejor material para el maquinado de engranajes el nylon o poliamida.

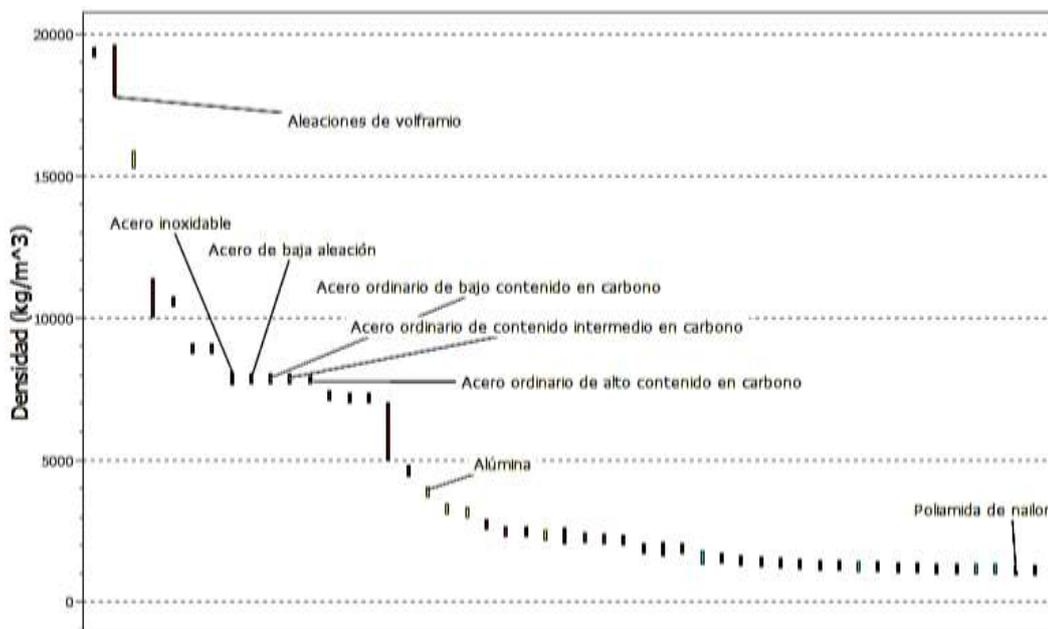


Figura 2.15 Diagrama densidad vs resistencia

2.7. LA BATERÍA

La batería es un dispositivo capaz de almacenar energía potencial para luego ser utilizada por algún circuito eléctrico, tiene dos modos de aprovechamiento de su carga el modo continuo y el modo flotante. En el modo continuo la batería es desconectada del dispositivo una vez culminada la energía, luego de este proceso se la vuelve a cargar mediante una fuente externa. En cambio, el modo flotante, la batería se encuentra conectada al dispositivo que la consume y a la vez a la fuente eléctrica, es decir cuando tiene

carga actúa como una fuente de corriente, y luego que está descargada se recarga a alta corriente hasta lograr cargar su energía y el cargador o fuente de energía se queda en modo sostenimiento de carga. (Tareasfacil, 2013)

2.7.1. Partes de una Batería.

Los principales elementos de la batería son: el recipiente el cual tiene una construcción sólida ya que alojan todos los componentes formativos de la misma como: las placas que son láminas rectangulares o cilíndricas encargadas de acumular la energía generada, están construidas en plomo o bañadas de este metal, generalmente son dos tipos negativas y positiva están separadas por láminas de madera de cedro que evitan que las dos se unan o rocen; estos tres elementos forman la llamada celda las mismas que al unirse con otras fijan la cantidad de almacenaje de a batería, finalmente como elemento conductor está el electrolito que es una sustancia química la cual posee iones libres que actúan como un conductor eléctrico y las conexiones que permiten unir a las celdas y los bornes de la batería. (Tareasfacil, 2013) (Garcia A. , 2014)

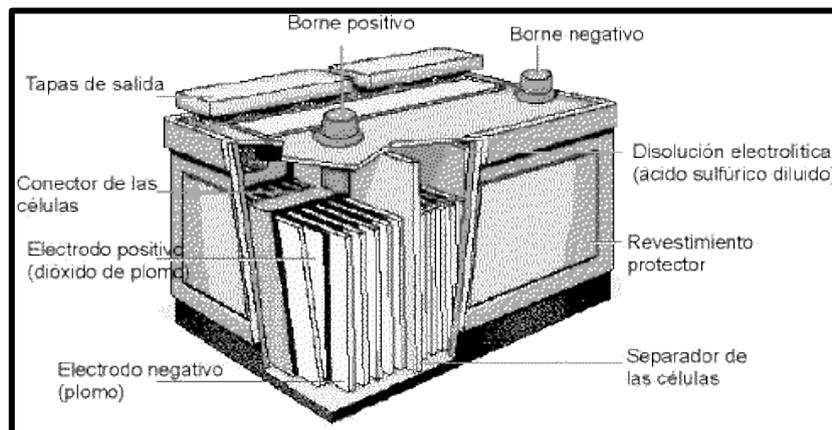


Figura 2.16 Batería y sus partes

Fuente: (Garcia A. , 2014)

2.7.2. Tipos de Células

Las células más utilizadas en la actualidad son:

- **Células de litio (Li-Ion).** - Poseen una densidad energética alta, lo que reduce el tamaño y el peso de la batería, no necesitan mantenimiento y no presentan efecto memoria, es decir, no requieren ciclos de carga y descarga para prolongar la vida de la batería.

- **Células de níquel-hidruro metálica (NiMH).** - Ostentan una resistencia interna superior a la de las células de níquel cadmio y por lo tanto no son aptas para corrientes de carga y descarga tan altas o temperaturas tan bajas. El hecho de que la resistencia interna sea más elevada hace que el voltaje de las baterías de NiMH descienda rápidamente a temperaturas bajo cero y con intensidades de corriente altas.

2.7.3. Metodologías usadas para carga de baterías

Los métodos de carga son distintos depende del tipo de batería, pero para la investigación se trata sobre los métodos para cargar baterías de litio la más usada en el medio actual en varios equipos e incluso prótesis inteligentes.

Un cargador eficiente para baterías de litio es un dispositivo el cual contiene un limitador tanto de corriente como voltaje ya que una carga completa y eficiente se logra al alcanzar el umbral superior de carga y se decrementa la corriente hasta estabilizarse en un porcentaje mínimo para luego pasar a cargar a bajo voltaje restante de la batería. Generalmente este porcentaje va desde el 3% o que es lo mismo 0.03°C. (bateriasdelitio, 2014)

- **Método de carga básico.** - El método de carga básico de una batería de litio utiliza un elemento electrónico que se encarga de censar los niveles de carga de la batería mediante un pin de realimentación (FeedBack) el cual, regula la tensión necesaria, para evitar daños en la batería, generalmente sirven para baterías de carga de ente 3 y 10 Voltios. (bateriasdelitio, 2014)
- **Método Sony.** - Es un sistema exclusivo de Sony, consiste en una gestión inteligente de la carga y descarga. Para ello, la empresa ha creado un microprocesador que integra la batería y un medidor de consumo. Este sistema analiza cuanto ha gastado y cuál ha sido la carga suministrada. El sistema es perfecto.
- **Carga con corriente constante.** - Utilizado para cargar varias baterías en forma serial, no es muy usado por su pequeño coeficiente de eficiencia y un efecto en la durabilidad de las baterías.
- **Carga con corriente semiconstante.** - Es un método de carga a baja corriente semiconstante, en la cual existe un veedor de carga, el cual analiza

los niveles en la batería, y suministra la carga; pero la corriente de carga pasa por un proceso de transformación y rectificación, con este método la batería reduce su vida útil y tiende a sufrir deformaciones. (Javier Guacaneme , Danny González , César Trujillo , 2003)

- **Carga con voltaje constante.** - En este método al igual que el anterior se censa la carga de la batería y luego se somete a una carga a corriente alta de inicio; dependiendo, del avance de la carga la corriente es disminuida, pero el voltaje se mantiene a un nivel constante, evitándose así el máximo deterioro de la batería y aumentando o preservando la vida útil predestinada. (Javier Guacaneme , Danny González , César Trujillo , 2003)
- **Carga inteligente.** - Ajusta el voltaje y la corriente suministrada a la batería basada en el seguimiento de los parámetros críticos de la misma como temperatura y células que la conforman. El método está diseñado para que un microcontrolador pueda controlar y ajustar cuidadosamente la tasa de carga, el tiempo, y, en algunos casos, el voltaje. Esta optimización se utiliza para aumentar la eficiencia de carga, reducir tiempo de la misma, y prolongar la vida útil. Las tasas de carga y los tiempos están optimizados para la química de la batería específica y las condiciones internas durante la carga.

2.8. SÍNTESIS DEL CAPÍTULO

En la tabla se fijan características relevantes del capítulo mismas que sirven para definir algunos parámetros del diseño mecánico.

Tabla 2.1 Síntesis capítulo 2

CARACTERÍSTICAS A CONSIDERAR
Los sistemas recolectores de energía existentes, tienen buenos resultados, pero el inconveniente principal es el peso del dispositivo
Los engranajes idóneos a usar son los rectos por su fácil fabricación y diseño, su aplicabilidad en sistemas de alta potencia y grandes revoluciones
El acero es el material más resistente, pero a la vez el más pesado y no se requiere peso en el sistema, aluminio en cambio es liviano pero su poca resistencia hace que sea vulnerable,
Nylon o poliamida tiene una alta resistencia, produce poco ruido y poco desgaste ideal para fabricar engranajes
Acrílico fácil manipulación, alta resistencia a la polilla, aceites y productos químicos, resistente al agua y al sol ideal para fabricación de cubiertas
La batería es un dispositivo capaz de almacenar energía potencial para luego ser utilizada por algún circuito eléctrico,
Las células de litio (Li-Ion) tiene una densidad energética alta, lo que reduce el tamaño y el peso de la batería se considera la batería de marca LG de 2600 mAh alimentación de 5 V y voltaje de salida de 5 V

CAPÍTULO III

LOCOMOCIÓN HUMANA Y SELECCIÓN DE ARTICULACIÓN

En este capítulo se destaca el estudio de la marcha realizada por el hombre y su correlación con la cosecha de energía eléctrica, además la elección de una la articulación idónea para el desarrollo del proceso.

3.1. ANÁLISIS BIOMECÁNICO DE LAS ARTICULACIONES

El cuerpo humano posee varias articulaciones, las cuales pueden ser aprovechadas para la cosecha o recolección de energía; clasificadas en dos grupos:

- Las que generan movimiento mediante un ángulo de trabajo, como: el codo, el hombro, los dedos y la rodilla.
- Las que generan mediante impacto o choque como el pie.

3.1.1. Biomecánica del Codo.

El codo es una articulación de constitución compleja cuyo movimiento simula el de una bisagra, está formada por el humero, el radio, el cúbito, los tendones y ligamentos, la membrana sinovial, las bolsas sinoviales y la capsula articular.

El codo posee movimientos limitados y dependientes del hombro y de la mano, pero los más destacados son: la flexión y la extensión en la cual su rango angular de trabajo es 0° en posición de completa extensión y en flexión tiende a llegar hasta 150° . (García E. J., El codo, 2013), (Articulaciones L. , 2009)

Así también se puede destacar la pronación y la supinación donde el codo gira entre 80° y 90° pero generalmente se da 50° de pronación y 50° de supinación. (García E. J., El codo, 2013), (Articulaciones L. , 2009)

Tabla 3.1 Ángulos de Flexión y Extensión del codo

	ADULTO	NIÑO	TRABAJO
FLEXIÓN	141+- 4.9°	146+- 6.3°	90°
EXTENSIÓN	0.3°	10°-15°	30°

Fuente: (García E. J., El codo, 2013)

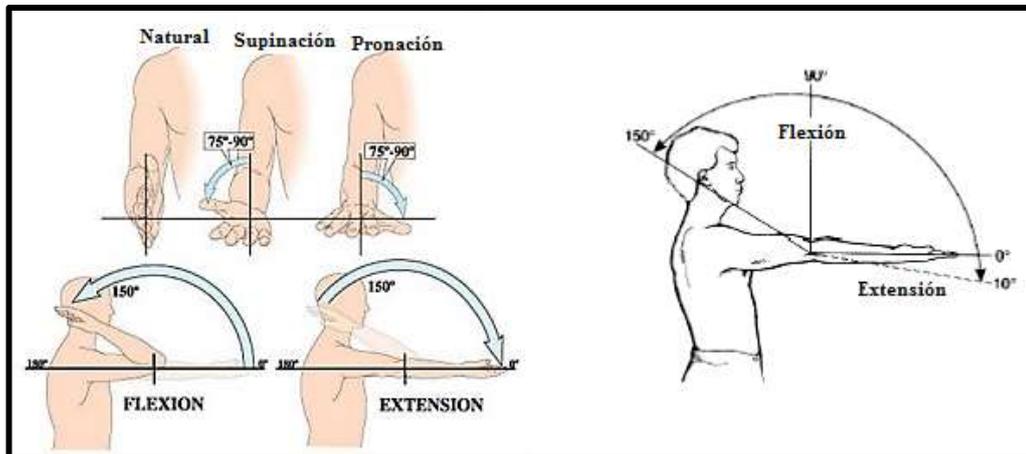


Figura 3.1 Movimientos del codo

Fuente: (Articulaciones, 2009), (García E. J., El codo, 2013)

3.1.2. Biomecánica del Hombro

Al igual que el codo, el hombro es una articulación muy importante en el desarrollo de la marcha humana, como también en el desarrollo de las actividades habituales del ser humano, esta articulación está conformada por el humero, la escapula, los tendones y ligamentos, la capsula articular, bolsas sinoviales, rodete glenoideo y el manguito de los rotadores. Esta articulación cumple la función de unir al brazo y el tronco. (García E. J., Clínica y exploración del hombro, 2013), (Articulaciones, 2009)

Los movimientos principales de la articulación son la flexión, la extensión, rotación externa, rotación interna, abducción y la aducción. Para que exista movimiento de esta articulación necesita de la ayuda de las articulaciones internas a él por ejemplo si cada 15 grados que el hombro tenga de abducción, 10 se los hace la articulación glenohumeral y 5 la articulación torácica, otro ejemplo cuando el hombro rota 180°, la articulación glenohumeral realiza 120° de este movimiento y 60° la torácica. (García E. J., Clínica y exploración del hombro, 2013), (Articulaciones, 2009)

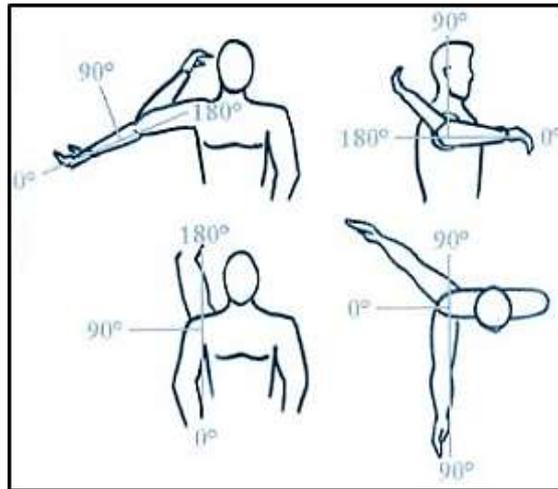


Figura 3.2 Movimientos del hombro

Fuente: (García E. J., Clínica y exploración del hombro, 2013)

3.1.3. Biomecánica de los dedos de la mano

Los dedos de la mano generalmente tienen un movimiento de flexión, extensión y abducción limitada en los 4 dedos sin contar con el pulgar.

La flexión máxima de un dedo está entre 90° y 100° y una extensión de 20° . (García, 2013)

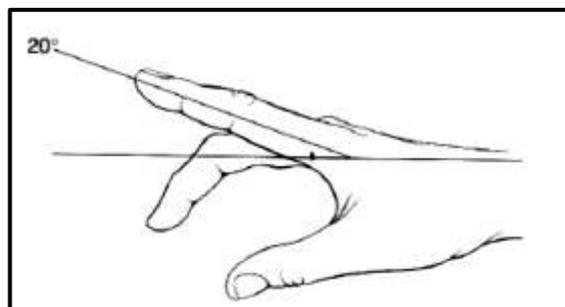


Figura 3.3 Movimientos de los Dedos

Fuente: (García, 2013)

3.1.4. Biomecánica de la Rodilla

La rodilla es la articulación móvil de mayor tamaño del sistema esquelético cumple la función de absorber la carga del cuerpo y la carga externa cuando se realiza alguna actividad. Por su movilidad en el proceso de flexo-extensión brinda un ángulo de aprovechamiento de sesenta grados en el cual la articulación no presenta una oposición al trabajo de recolección. (Knudson, 2007) , (J. Maxwell , Veronica Naing, Qingguo Li, 2009)

3.2. JUSTIFICACIÓN DE LA ARTICULACIÓN DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA

El cuerpo humano, es rico en articulaciones útiles para recolectar energía, pero cada uno de ellos tiene sus ventajas y desventajas por esta razón se analiza las ventajas y desventajas para justificar la articulación seleccionada.

3.2.1. El Codo

El codo tiene la gran ventaja de tener movimientos independientes es decir no depende de otra articulación, posee ángulos de fácil aprovechamiento y acople para artilugios.

La principal desventaja es que la articulación en el desarrollo de la marcha humana no tiene grandes movimientos oscilatorios de adelante hacia atrás o viceversa, por tal motivo no genera ángulos aprovechables para nuestro propósito.

3.2.2. El Hombro

El hombro, otra atractiva articulación que posee grandes ángulos de movimiento, pero no es de fácil acceso para acoplar ningún artilugio mecánico, de igual manera sus desplazamientos angulares dependen de movimientos sincronizados de dos articulaciones proporcionales, tal que dificultaría la cosecha de energía.

3.2.3. Los Dedos

Al igual que las articulaciones anteriores, poseen ángulos de desplazamiento importantes, pero el principal inconveniente es acoplar algún elemento mecánico debido a su reducida zona de aplicación, para una mejor recolección se debe aplicar a todos los dedos el artilugio.

3.2.4. La Articulación Óptima (Rodilla)

Considerando todo el análisis de las ventajas y desventajas de las articulaciones significativas del cuerpo humano y el análisis biomecánico de las mismas, se ha determinado que la opción más lógica y significativa para la cosecha de energía es la rodilla, pues la facilidad de acople de artilugios mecánicos brinda gran oportunidad para cumplir el objetivo, así también la gran participación en el desarrollo de la caminata garantiza que la cosecha será constante mientras se produzca el evento

Podemos citar que la rodilla es una de las “articulaciones más grandes y fuertes del cuerpo humano”,³ garantizando así un buen torque. Con estas ventajas podemos decir que la opción óptima para la cosecha de energía es la rodilla.

3.3. ANATOMÍA, FISIOLOGÍA Y BIOMECÁNICA DE LA RODILLA

La biomecánica se apropia de los conceptos de la física y la ingeniería para describir el movimiento del cuerpo humano y las fuerzas que actúan sobre los mismos durante las actividades normales del hombre.

En este subtema se describe la relación fuerza movimiento de la articulación y los conceptos básicos que dan las pautas finales para la creación del diseño mecatrónico que solucione el problema en cuestión.

3.3.1. Anatomía y fisiología de rodilla

La rodilla como se explico es una de las articulaciones de mayor tamaño y de suma importancia en el cuerpo humano, puede ser considerada la más relevante en el desarrollo de la caminata humana. Para su análisis se divide en planos, ángulos, sus diferentes huesos y cartílagos que nos brindara la oportunidad de conocer de mejor manera su funcionamiento y constitución interna.

³ Dihigo, M. E. (2001). *Anatomía Fisiología e Higiene*. Habana: Impresores Habana. Recuperado el 18 de 03 de 2015

3.3.2. Ejes principales y planos de referencia.

Al considerar el cuerpo humano como un sistema se definen ejes y planos de referencia, pero generalmente se definen tres ejes y planos principales:

- **Eje Longitudinal:** El eje longitudinal o vertical es aquel que estando el cuerpo humano en posición erguida está perpendicular a la base.
- **Eje Horizontal:** Es llamado también eje transversal está visto en proyección de izquierda a derecha del cuerpo humano, como también perpendicular al eje longitudinal
- **Eje Sagital:** Se proyecta de la parte posterior a la anterior y es perpendicular al eje longitudinal y al horizontal.

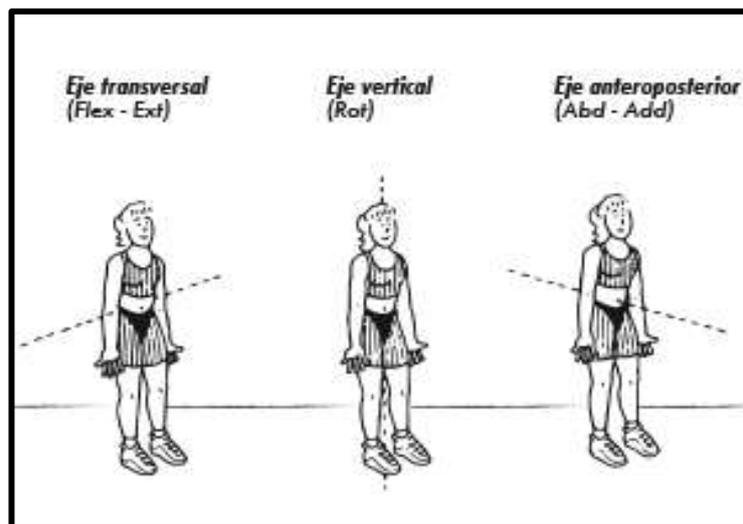


Figura 3.4 Ejes Principales de Referencia (Solsona, 2006)

Fuente: Solsona, D. S. (2006). Nopainrun. Recuperado el 28 de Diciembre de 2015, de Biomecánica de la rodilla: <http://www.nopainrun.com/biomecanica-rodilla.html>

Con estos tres ejes principales de referencia se puede establecer los planos de referencia.

- **Plano Sagital:** Llamado también Plano medio, este Plano recorre a lo largo del eje sagital y divide al cuerpo humano en dos mitades iguales mitad izquierda y mitad derecha.

- **Plano Transversal:** Es el plano que divide al cuerpo transversalmente en parte superior y parte inferior.
- **Plano Frontal o Coronal:** Este plano incluye a todos los planos orientados paralelamente al frente del cuerpo humano.

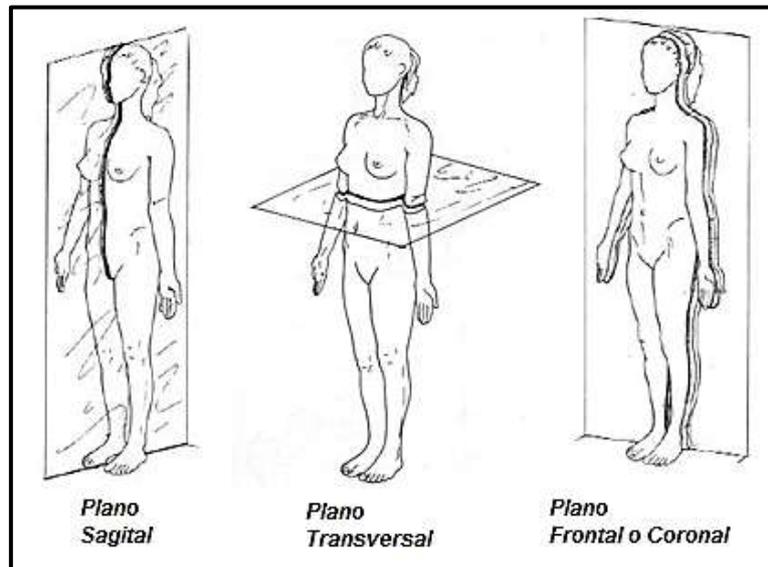


Figura 3.5 Plano Transversal
Fuente: (Solsona, 2006)

3.3.3. Los Huesos

Los huesos son los elementos más importantes en el ser vivo ya que son los encargados de dar forma y sostén al cuerpo humano, son como un armazón perfecto.

También cumplen la función de proteger órganos importantes como el corazón y los pulmones, y formar las articulaciones que permiten la movilidad del ser humano.

- **Huesos de la Rodilla.** - La rodilla al ser el elemento que soporta la carga del cuerpo y las cargas externas, es la más grande del esqueleto, consta de tres huesos principales y un hueso secundario de complemento, ligamentos, tendones y músculos los cuales brindan a la articulación desarrollo y movilidad suave silencioso y cadencioso, se podría decir que es la articulación más completa de la anatomía del hombre. (Dihigo, 2001)

- **El Fémur.** - Es el hueso más largo del esqueleto acoge al muslo como musculo principal, el ángulo entre el cuello femoral y la diáfisis del fémur en un adulto esta entre 125 y 126 grados mientras que en un adulto mayor es superior a 126 grados (Dihigo, 2001)
- **Rótula.** - La rótula es un hueso sesamoideo conocido así por estar incrustado dentro de un tendón, lo que le da gran movilidad. (Dihigo, 2001)
- **Tibia y Peroné.** - La Tibia y el peroné son huesos largos y robustos, juntos soportan el peso corporal y se encargan de transmitir la fuerza de la rodilla al tobillo (Dihigo, 2001).

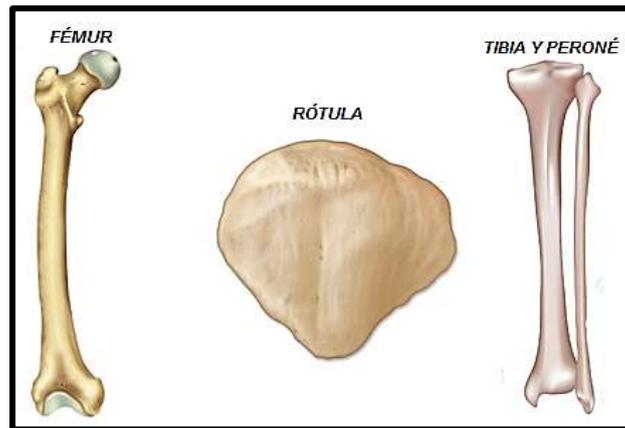


Figura 3.6 Huesos de la rodilla
Fuente: (Solsona, 2006)

3.3.4. Meniscos

Los meniscos son estructuras que tienen la forma de una C y están conformados por fibrocartílagos en sus dos caras cóncava y plana, características que los hacen funcionar como un colchón o un amortiguador. (López, 2012)

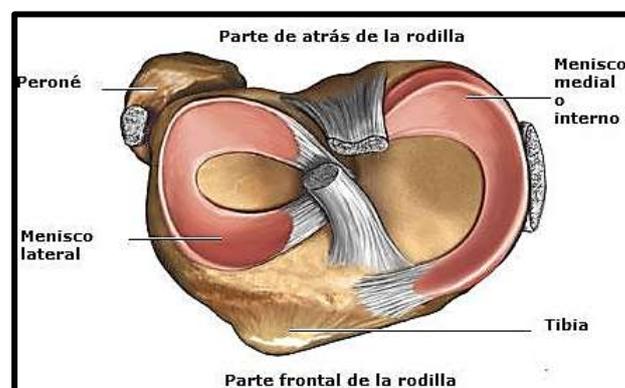


Figura 3.7 Meniscos
Fuente: (Solsona, 2006)

3.3.5. Ligamentos

El ligamento es una estructura formada por tejido fibroso duro, que conecta los extremos de los huesos, su función es brindar firmeza, estabilidad y movilidad a la articulación, como también prevenir que la rodilla se mueva demasiado hacia los lados, atrás y adelante. (López, 2012)

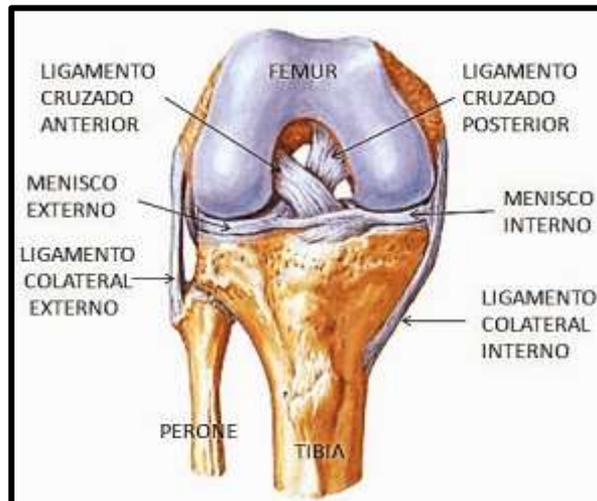


Figura 3.8 Ligamentos
Fuente: (Ramirez, 2013)

3.3.6. Músculos y Tendones

En la rodilla cruzan muchos y diversos tipos de músculos y tendones provocando movimientos y estabilidad, podemos clasificarlos en dos grupos generales como extensores y flexores.

- **Exensores.** Dentro de los músculos extensores podemos citar en forma general al cuádriceps femoral el cual es considerado como el músculo motor para caminar así también es el encargado de sostener el peso corporal, mover la articulación de rodilla, cadera y la pelvis. (SportLife, 2010)
- **Flexores.** - Estos músculos están ubicados en la parte trasera del muslo los más relevantes son el semitendinoso y el semimembranoso los cuales trabajan cuando la pierna es flexionada, y generan una rotación interna (López, 2012)

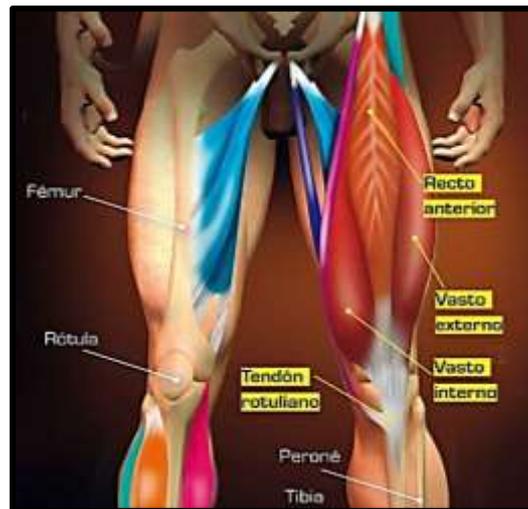


Figura 3.9 Ligamentos Músculos y Tendones
Fuente: (SportLife, 2010)

3.3.7. Cinemática de la Rodilla

La rodilla es una articulación de estructura biarticular compuesta por la articulación tibiofemoral y la articulación femorrotuliana.

La cinemática define el rango de movimientos y describe el movimiento de la superficie de una articulación en tres planos. Frontal, sagital y transversal, (Nordin, 2004)

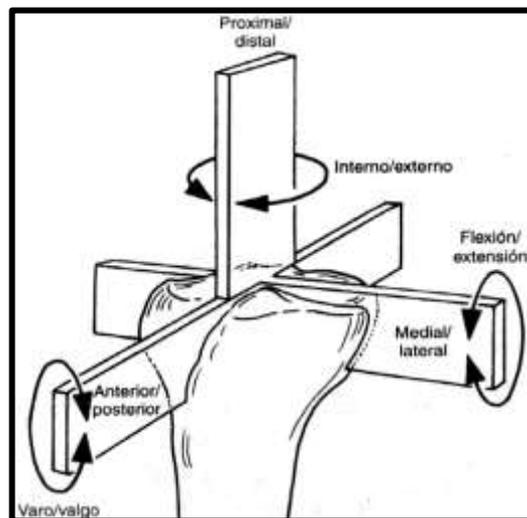


Figura 3.10 Cinemática de la Rodilla
Fuente: (Nordin, 2004)

3.3.8. Movimientos

Los ejes del fémur y la pierna no se encuentran alineados por ello forman un ángulo obtuso de entre 170° a 175° , este fenómeno es conocido como Valgus fisiológico de la rodilla o deformaciones naturales de la rodilla.

Las articulaciones de cadera, rodilla y tobillo forman el denominado eje mecánico del miembro inferior el cual define un ángulo de 6° con respecto al fémur este eje generalmente forma una definida línea recta.

El ángulo de deformación fisiológico normal varía entre hombre y mujer de acuerdo a la longitud de la cadera, este ángulo puede llegar a variar hasta en 3° entre el eje mecánico y la línea vertical que forma la extremidad, estas variaciones se desarrollan en la niñez, pero son corregidas durante el crecimiento de los seres humanos.

Cuando el ángulo de Valgus presenta una deformación fuera de lo normal se generan dos fenómenos conocidos como genu varum (varo) o de rodillas arqueadas y el de genu valgum (valgo) o de rodillas juntas y tobillos separados también llamada forma de x. (Solsona, 2006)

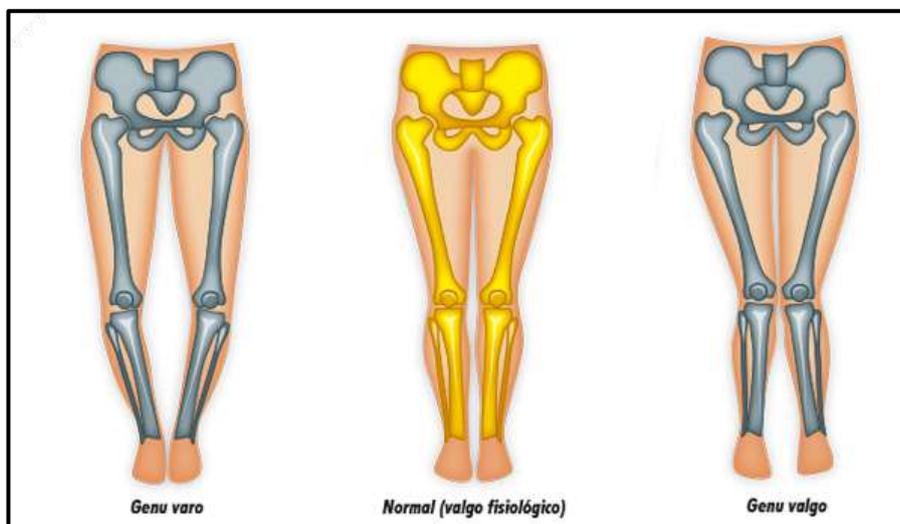


Figura 3.11 Valgus Fisiológico
Fuente: (Solsona, 2006)

3.3.9. Flexión y Extensión

- **Flexión.** - La flexión es el movimiento en el cual la pierna va hacia el muslo, este movimiento puede ser de dos tipos absoluta y relativa, la flexión absoluta se caracteriza por que se inicia tomando en cuenta una posición de referencia y la relativa parte de cualquier posición.

Una flexión de la rodilla puede ser total siempre y cuando el talón llegue a tocar la parte posterior del muslo lógicamente esta flexión está limitada por las condiciones musculares de la pantorrilla y el muslo, caso contrario una flexión normal describe un ángulo de entre 140° y 120° considerando la posición de la cadera de la persona. (Solsona, 2006)

- **Extensión.** - Es lo contrario a la flexión, la pierna se aleja del muslo este movimiento es esencial en el desarrollo de la marcha ya que el miembro entra en balance y se adelanta para entrar en contacto con el suelo en un paso. (Dihigo, 2001)

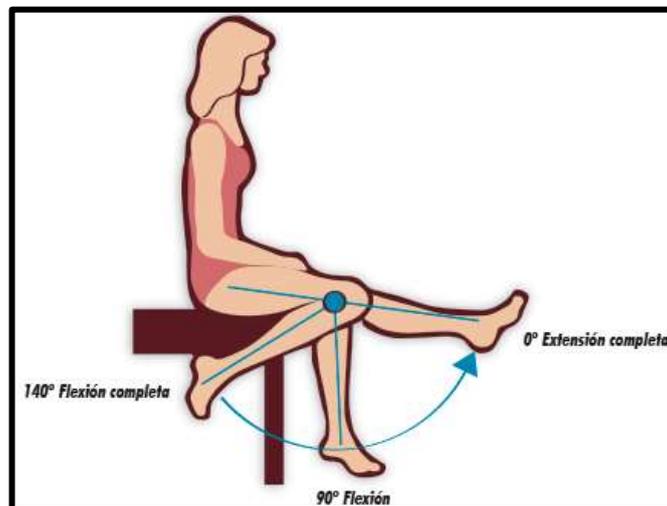


Figura 3.12 Movimiento de Flexión y Extensión.
Fuente: (Solsona, 2006)

3.3.10. Rotación

La rotación solo se presenta en tres ocasiones cuando el pie gira hacia adentro produciéndose una rotación de 30° y la rodilla en estado de flexión y la rotación externa se produce al contrario de la anterior el pie sale o gira hacia afuera entre 30° y 40° , si el sujeto se encuentra en estado pasivo estas rotaciones tienden a ser mayores. La última rotación que se produce en la articulación es involuntaria y a la vez inevitable esta sucede casi siempre ya que su presencia es apreciable en los movimientos de flexión y extensión. (Solsona, 2006)

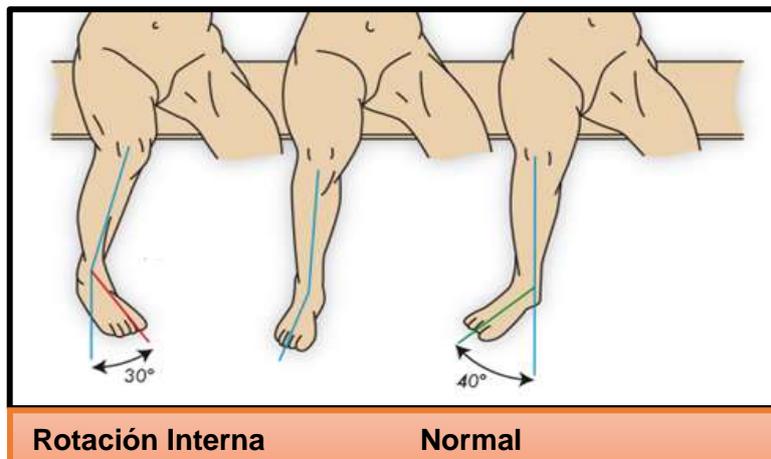


Figura 3.13 Rotación de la Rodilla
Fuente: (Solsona, 2006)

3.3.11. Cinética de la Rodilla.

La cinética estudia el análisis tanto dinámico como estático de fuerzas y momentos que actúan sobre una articulación. Las fuerzas en la rodilla generalmente son originadas por el propio peso del cuerpo las más representativas pueden ser:

3.3.12. Desviaciones varizantes.

Es la distancia que existe entre el eje de gravedad de la pierna y el centro de la rodilla es definida en milímetros y generalmente su medición esta entre los 40 y 45 mm. Esta puede ser intrínseca y extrínseca la primera puede definirse como la distancia entre el eje mecánico del miembro y el centro de la rodilla y la extrínseca es la distancia entre la línea de gravedad y el eje mecánico.

3.3.13. Compresión frontal.

Son las fuerzas creadas por la acción de los músculos y el peso corporal. “Esta resultante coincide con las espinas tibiales y su desviación a medial o lateral provocará deformidades artrósicas a expensas de varo o valgo respectivamente” (Cerveró)

3.3.14. Cizallamientos.

El cizallamiento puede ser de tres tipos el articular que corresponde a la fuerza que se genera en los apoyos de los cóndilos femorales sobre los platillos tibiales. El frontal que se origina en los cóndilos femorales y el mismo fémur y finalmente el sagital que se crea por acción del rozamiento y el desplazamiento.

(M.A Gómez , H.G. Alvarado R., 2010)

3.4. LA MARCHA HUMANA.

La marcha es el medio mecánico de locomoción del ser humano. Este proceso implica la transformación de una serie de movimientos controlados y coordinados, que se efectúa por la interacción de varias articulaciones.

3.4.1. Fases del ciclo de la marcha normal.

Dentro de la marcha se han definido dos procesos esenciales el apoyo y el balanceo (Física, 2007);

- **La fase de apoyo:** Abarca el sesenta por ciento del proceso normal de la marcha, esta fase inicia con el primer toque del talón a la superficie en que se encuentre el individuo y finaliza, cuando la parte anterior del pie es levantada del suelo.
- **La Fase de balanceo u oscilación** conforma el cuarenta por ciento de la caminata e inicia cuando la parte anterior del pie, despega del suelo de contacto y continua libremente por un instante en el aire, hasta el siguiente contacto con la superficie. Tomando en cuenta que en algún momento los dos pies del individuo están en contacto con el suelo este proceso o fase se le denomina periodo de doble apoyo. (Física, 2007)

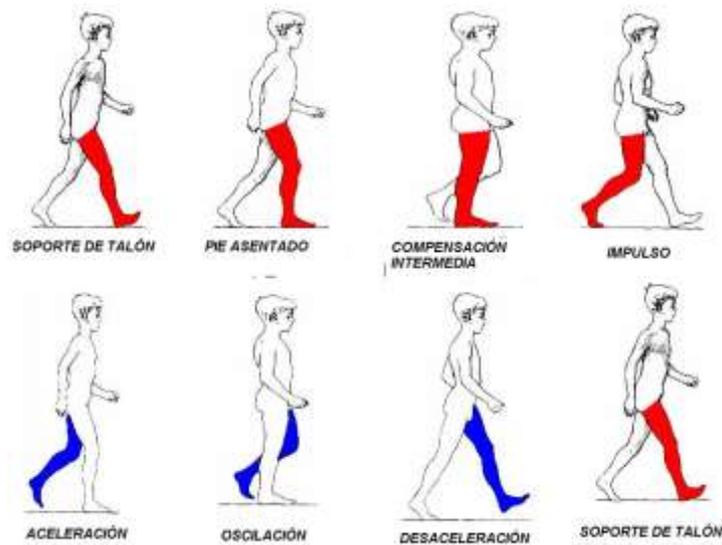


Figura 3.14 Marcha normal
Fuente: (Solsona, 2006)

3.4.2. Parámetros de la marcha

Los parámetros de la marcha dependen mucho de los factores físicos tales como la talla, el peso, la edad, las patologías y los trastornos locomotores de las personas, así también de las propiedades mismas de la marcha como la velocidad, la cadencia la zancada y el largo del paso (Física, 2007).

La distancia medida cuando los dos pies se encuentran en la superficie de contacto, entre talón izquierdo y talón derecho se la conoce como el largo del paso, el mismo que se complementa con la velocidad de desplazamiento del cuerpo a lo largo de la marcha, esta capacidad es determinada por la zancada que es la distancia medida, cuando el pie asienta en la superficie de contacto, hasta que nuevamente el mismo pie toque el suelo, lógicamente no estaría la marcha completa sin la cadencia que es la cantidad de pasos realizados en un determinado tiempo, todo este proceso más las características mismas del ser humano son los parámetros a considerar en la marcha humana. (Física, 2007)

3.4.3. El centro de gravedad durante la marcha.

El centro de gravedad es muy importante, de él depende el consumo energético en el desarrollo de la caminata debido a que, si el centro de gravedad va en línea recta y equilibrado el gasto energético es normal o mínimo, pero si el

centro de gravedad esta desalineado o desplazado el gasto energético será excesivo y a la vez abra más esfuerzo. (Física, 2007)

3.4.4. Características determinantes de la marcha

Durante la marcha normal suceden movimientos o situaciones determinantes las cuales puede ser:

- **Rotación pélvica:** Durante la marcha normal la pelvis sufre movimientos tanto al dar el paso delante con un pie como también con el pie que queda tras, la pelvis se adelanta a la pierna que va a dar el paso, esto gracias a la rotación de cadera y la hemipelvis homolateral, al mismo tiempo la pierna que queda atrás genera la misma rotación, esta suma de los dos movimientos es conocida como rotación pélvica.
- **Inclinación pélvica:** la pelvis a más de sufrir una rotación, también tiene que afrontar una inclinación o descenso justo al pasar por la fase de balanceo, con el propósito de brindar estabilidad y cadencia a la marcha, lógicamente si la caída de la hemipelvis es exagerada tiende a convertirse en una patología de la marcha.
- **Flexión de la rodilla durante la fase de apoyo:** durante la fase de apoyo la rodilla la pelvis y la cadera buscan mantener una buena posición del centro de gravedad para ello la rodilla realiza una flexión de 10 a 20 grados para minimizar el desplazamiento del centroide o centro de gravedad.
- **Ancho de la base de sustentación:** esta distancia prácticamente marca la separación entre el movimiento de la pelvis dentro de la caminata, tomando en consideración el movimiento para la pierna derecha como para la izquierda, si esta distancia es demasiado pequeña la estabilidad se perdería por que se modifica el centro de gravedad. Y de igual manera en sentido contrario, generando un mayor gasto energético.
- **Rotación recíproca de la cintura escapular:** Tanto la cintura escapular como la pélvica rotan alternadamente para conservar la energía potencial y así realizar de una manera más fácil y cadenciosa el siguiente paso. (Física, 2007)

3.5. VELOCIDAD ANGULAR DE RODILLA DURANTE LA MARCHA.

Considerando que la rodilla en posición de reposo forma un ángulo de 180° y en el desarrollo de la marcha en el cambio de extensión a flexión se produce un ángulo de flexión negativo de 120° , se considera como un ángulo de consumo energético, pero al pasar de flexión a extensión el movimiento mismo es sutil y positivo generando un ángulo de 60° o que es lo mismo 1 rad/s el cual garantiza un mínimo gasto energético y un alto porcentaje de generación de energía (Knudson, 2007) , (J. Maxwell , Veronica Naing, Qingguo Li, 2009)

Ecuación 3.1.

$$Wear = \frac{60^\circ}{s} \times \frac{1 \text{ rev}}{360^\circ} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}$$

$$Wear = 10 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

Wear será la velocidad de entrada de la articulación de rodilla.

(Knudson, 2007) , (J. Maxwell , Veronica Naing, Qingguo Li, 2009)



Figura 3.15 Marcha normal y sus ángulos

Fuente: (Jorge, 2016)

3.6. SÍNTESIS DEL CAPÍTULO

Tabla 3.2 Síntesis capítulo 3

CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES
El codo puede brindar un Angulo de flexión de 90° y 30° de extensión, pero su poco espacio y su dependencia de otra articulación no lo hacen un buen candidato para la cosecha de energía
El hombro mediante el análisis de sus movimientos es una articulación altamente dependiente de articulaciones internas para generar movimiento, además de contar con un difícil acople de cualquier dispositivo.
Los dedos son muy pequeños para alojar algún artilugio mecánico, aunque sus ángulos de flexión son altos entre 90° y 100° y extensión de 20°
La rodilla posee una superficie grande ideal para montar algún sistema, sus ángulos de flexo- extensión aprovechables son de 60° y de extensión -flexión de 120°.
Para el diseño del dispositivo se considera el plano sagital para análisis
El fémur es el hueso más grande del cuerpo humano y aloja al muslo el musculo encargado de la marcha humana.

CAPÍTULO IV

DISEÑO DEL GENERADOR

En este capítulo se destaca el diseño, elementos mecánicos y eléctricos como también el modelo matemático de un mecanismo capaz de transmitir el movimiento de la rodilla en una caminata normal, que permita cargar una batería aprovechando el dispositivo.

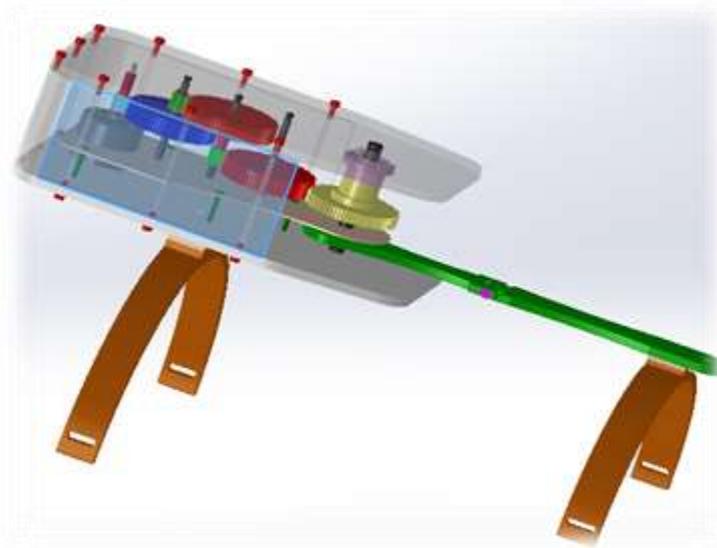


Figura 4.1 Generador de energía mediante la marcha humana

4.1. DISEÑO MECÁNICO

Para destacar el diseño mecánico se considera algunos elementos anatómicos de la rodilla humana ya que el diseño se basa en brindar ayuda al ser humano y mas no una molestia o incomodidad en el diario caminar.

4.1.1. Condiciones iniciales de diseño

4.1.1.1. *Anatómicas*

Tomando en consideración que el musculo vasto lateral y el vasto externo en una persona medianamente activan y con poco ejercicio, mide entre 8 y 13 cm, limita a que, toda la estructura no puede sobrepasar estas dimensiones, debido a que se violaría las condiciones de confort de la persona a usar el equipo. (Infomed red de salud Cuba)

Así como no debe exceder en el largo tampoco debe ser tan ancho para ocasionar molestias al usuario no se ha considerado el ancho en base a las condiciones anatómicas debido a que no se cuenta con un justificativo relevante sobre este aspecto.

El sistema no puede ser de un elevado peso debido a que podría causar un esfuerzo excesivo y a la vez podría ser la causa para una lesión parcial o permanente en la pierna que lo use.

4.1.1.2. Estéticas

El sistema no debe ser una muestra de burla o que llame exageradamente la atención a las personas debido a que produciría rechazo al usuario.

Los soportes o sujeciones deben ser firmes pero cómodos para no ocasionar una lesión o un esfuerzo mayor al normal de los músculos de la pierna.

4.1.1.3. Mecánicas

Tren de engranajes (multiplicadora)

La salida de un generador es directamente proporcional a la velocidad angular y para el estudio es directamente proporcional a la transformación de movimiento o transmisión multiplicadora, para cumplir eficientemente y tener una potencia eléctrica apreciable la relación de transmisión tiene que maximizar el par que proporcione la rodilla.

Para lograr la relación de transmisión más alta implica aumentar el diámetro del engranaje, o que el piñón sea de diámetro decreciente o ambos, pero los diámetros de engranajes no pueden ser realizados tan grandes, debido a la restricción de tamaño, o muy pequeños si se toma en cuenta la resistencia y posible ruptura.

Tampoco debe tener excesivos pares de engranajes o relaciones individuales de transmisión por que violaríamos la restricción de peso excesivo y provocaría un desgaste energético en la persona.

Los generadores rotatorios del mercado típicamente giran a velocidades de entre 1000-10.000 rpm, (Mabuchi).

4.1.2. Relación de transmisión.

En el diseño de engranajes es muy acertado tomar en cuenta los parámetros de material, peso, número de dientes, y los esfuerzos de los dientes para el trabajo a efectuar.

Considerando las condiciones anatómicas y estéticas los engranajes del sistema son diseñados en base a esas restricciones.

4.1.2.1. *Relación de transmisión requerida por el sistema a máxima eficiencia*

Tomando en consideración los datos del fabricante del generador a máxima eficiencia la velocidad es de $2190 \text{ rev}/\text{min}$, este valor será la velocidad del generador [Wg], la cual nos permite obtener la relación de transmisión necesaria para un trabajo a máxima eficiencia. (Mabuchi)

Con Wear y Wg se define la relación de transmisión requerida.

Ecuación 4.1.

$$R_{max} = \frac{Wg}{Wear}$$

$$R_{max} = 219$$

Siendo:

Wear: Velocidad de entrada al generador

Wg: Velocidad proporcionada por la rodilla

Rmax: Relación de transmisión máxima

(Norton R. L., 2009)

4.1.2.2. *Relación de transmisión piñón engranes*

Un piñón no debe tener menos de doce dientes tomando como parámetro de diseño un piñón de 16 dientes y un engranaje no menor de 93 dientes tomando en cuenta las restricciones de tamaño y peso, por tal motivo se usa el conjunto piñón-engrane 16 – 93 para los cálculos respectivos.

Conocido el número de dientes del conjunto piñón engrane se define la relación de transmisión que entre ellos se producirá utilizando las ecuaciones básicas de relación de transmisión.

Ecuación 4.2.

$$R_{eng} = \frac{z \text{ de dientes engrane}}{z \text{ dientes piñón}}$$

$$R_{eng} = 5.81$$

Donde

z: número de dientes

(Norton R. , 2009)

4.1.2.3. *Relación de transmisión requeridas por el sistema*

Para lograr que la velocidad proporcionada por la articulación de rodilla sea semejante a la requerida por el generador se aplica un cierto número de pares engrane piñón tales que lleguen a multiplicar su relación de transmisión y tener la entrada que el generador necesita.

Teniendo en cuenta la relación entre piñón – engranaje encontrada más la relación requerida por el sistema se obtiene el número de relaciones piñón – engrane necesaria para que el objetivo se cumpla.

Ecuación 4.3.

$$R_{eng}^n = R_{max}$$

$$n \log R_{eng} = \log 219$$

$$n = 3.1 \text{ veces}$$

Sabiendo:

n: Número de ocasiones que se repetirá el par piñón- engranaje

R_{eng}: Relación de transmisión piñón- engrane

R_{max}: Relación de transmisión requerida por el sistema

4.1.3. Diseño de engranajes.

4.1.3.1. Piñones de acople

El piñón es la rueda dentada más pequeña de un mecanismo, o un par de ruedas dentadas, por lo tanto, para generar los cálculos se toma los datos generales, basados en las restricciones citadas anteriormente, por tal motivo el piñón de acople al generador, como los piñones de cada etapa del tren de engranajes consta de las mismas características, a excepción del diámetro interior, ya que el acople es de 2 mm y el resto de piñones del tren es de 3 mm, son manufacturados en poliamida 6 propiedades Anexo A

Tabla 4.1 Datos generales para el diseño de piñones

DATOS GENERALES PARA EL DISEÑO DE PIÑONES	
Módulo de Presión (PA)	20°
Número de Dientes (N)	16
Módulo (MDL)	0.50
Diámetro Interior (AE)	2 mm y 3 mm multiplicadores
Material	Poliamida

- **Diámetro de Paso (PD) mm**

Ecuación 4.4.

$$PD = MDL \times N$$
$$PD = 8 \text{ mm}$$

Donde:

MDL: Módulo

N: Número de dientes

- **Altura de Cabeza (ADD) mm**

Ecuación 4.5.

$$ADD = MDL$$
$$ADD = 0.5 \text{ mm}$$

Donde:

MDL: Módulo

- **Altura de Pie (DED) mm**

Ecuación 4.6.

$$DED = 1.157 \times MDL$$

$$DED = 0.5785 \text{ mm}$$

Donde:

MDL: Módulo

- **Profundidad Total (WD) mm**

Ecuación 4.7.

$$WD = ADD + DED$$

$$WD = 1.079 \text{ mm}$$

Donde:

ADD: Altura de cabeza.

DED: Altura de pie.

- **Holgura (CL) mm**

Ecuación 4.8.

$$CL = 0.157 \times MDL$$

$$CL = 0.079 \text{ mm}$$

Siendo:

MDL: Módulo

- **Diámetro Externo (OD) mm**

Ecuación 4.9.

$$OD = MDL \times (N + 2)$$

$$OD = 9 \text{ mm}$$

Siendo:

MDL: Módulo

N: Número de dientes

- **Diámetro de Raíz (RD) mm**

Ecuación 4.10.

$$RD = PD - (2.314 \times MDL)$$

$$RD = 6.843 \text{ mm}$$

- **Circulo de Base (BC) mm**

Ecuación 4.11.

$$BC = PD \times \cos \left(PA \times \frac{\pi}{180} \right)$$

$$BC = 7.518 \text{ mm}$$

Donde:

PD: Diámetro de paso

PA: Módulo de presión

- **Paso Circular (CP) mm**

Ecuación 4.12.

$$CP = \pi \times MDL$$

$$CP = 1.571 \text{ mm}$$

Donde:

MDL: Módulo

- **Espesor Circular (T) mm**

Ecuación 4.13.

$$T = \frac{\pi \times PD}{2N}$$

$$T = \frac{\pi \times MDL}{2}$$

$$T = 0.7853 \text{ mm}$$

Donde:

MDL: Módulo

PD: Diámetro de paso

N: Número de dientes

- **Espesor de Cabeza de Diente (ADDc) mm**

Ecuación 4.14.

$$ADDc = ADD + \left(\frac{T^2}{4 \times PD} \right)$$

$$ADDc = 0.519 \text{ mm}$$

Donde:

ADD: Altura de cabeza

PD: Diámetro de paso

T: Espesor circular

- **Profundidad de trabajo (WKG) mm**

Ecuación 4.15.

$$WKG = 2 \times ADD$$

$$WKG = 1 \text{ mm}$$

Donde:

ADD: Altura de cabeza

- **Ángulo de Diente en Grados**

Ecuación 4.16.

$$\alpha = \frac{T}{\frac{PD}{2}} \times \frac{180}{\pi}$$

$$\alpha = 11.25^{\circ}$$

Donde:

PD: Diámetro de paso

T: Espesor circular

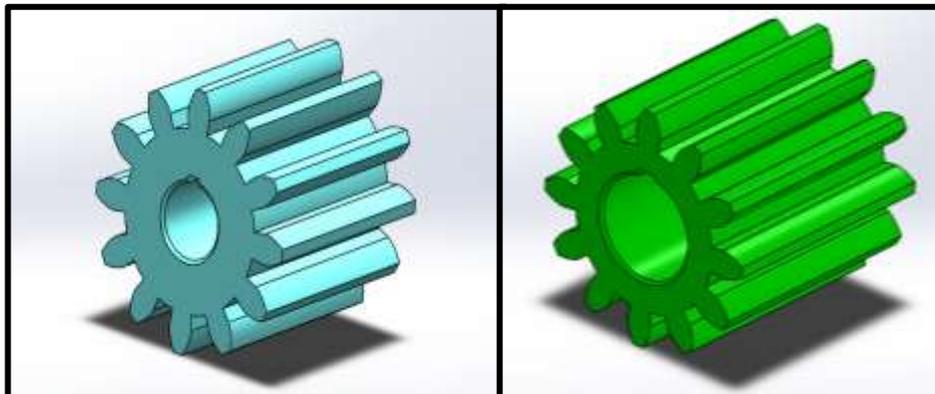


Figura 4.2 Piñón de Acople y Piñón del Tren de Engranajes

4.1.3.2. **Engrane multiplicador y racha**

Las ruedas destinadas a complementar una relación de transmisión en un tren de engranajes, es el engrane o corona por lo que generalmente es más grande que el piñón, por ello el cálculo de diseño de los engranes para la transmisión de la rodilla que se denomina racha tendrán el mismo número de dientes y los mismos datos de diseño con la diferencia que los engranes del tren serán de un diámetro interior de 3mm y el de la palanca de mando será de 6mm

debido a que este es el encargado de transmitir la fuerza de la rodilla y a la vez sostiene la palanca de acople a la articulación. Al igual que los piñones los engranes serán contruidos de poliamida 6.

Tabla 4.2. Datos Generales para el Diseño de Engranajes

DATOS GENERALES PARA EL DISEÑO DE ENGRANAJES	
Módulo de presión (PA)	20 ⁰
Número de Dientes (N)	93
Módulo (MDL)	0.5
Diámetro Interior (AE)	3 mm y 6 mm en la racha
Material	Poliamida 6

- **Diámetro de Paso (PD) mm**

Ecuación 4.17.

$$PD = MDL \times N$$

$$PD = 46.50 \text{ mm}$$

Donde:

MDL: Módulo
N: Número de dientes

- **Altura de Cabeza (ADD) mm**

Ecuación 4.18.

$$ADD = MDL$$

$$ADD = 0.5 \text{ mm}$$

Donde:

MDL: Módulo

- **Altura de Pie (DED) mm**

Ecuación 4.19.

$$DED = 1.157 \times MDL$$

$$DED = 0.579 \text{ mm}$$

Donde:

MDL: Módulo

- **Profundidad Total (WD) mm**

Ecuación 4.20.

$$WD = ADD + DED$$

$$WD = 1.079 \text{ mm}$$

Donde:

ADD: Altura de cabeza.

DED: Altura de pie.

- **Holgura (CL) mm**

Ecuación 4.21.

$$CL = 0.157 \times MDL$$

$$CL = 0.079 \text{ mm}$$

Siendo:

MDL: Módulo

- **Diámetro Externo (OD) mm**

Ecuación 4.22.

$$OD = MDL \times (N + 2)$$

$$OD = 47.50 \text{ mm}$$

Siendo:

MDL: Módulo

N: Número de dientes

- **Diámetro de Raíz (RD) mm**

Ecuación 4.23.

$$RD = PD - (2.314 \times MDL)$$

$$RD = 45.34 \text{ mm}$$

- **Circulo de Base (BC) mm**

Ecuación 4.24.

$$BC = PD \times \cos \left(PA \times \frac{\pi}{180} \right)$$

$$BC = 43.696 \text{ mm}$$

Donde:

PD: Diámetro de paso

PA: Módulo de presión

- **Paso Circular (CP) mm**

Ecuación 4.25.

$$CP = \pi \times MDL$$
$$CP = \pi \times 0.5$$
$$CP = 1.571 \text{ mm}$$

Donde:

MDL: Módulo

- **Espesor Circular (T) mm**

Ecuación 4.26.

$$T = \frac{\pi \times PD}{2N}$$
$$T = \frac{\pi \times MDL}{2}$$
$$T = 0.785 \text{ mm}$$

Donde:

MDL: Módulo

PD: Diámetro de paso

N: Número de dientes

- **Espesor de Cabeza de Diente (ADDc) mm**

Ecuación 4.27.

$$ADDc = ADD + \left(\frac{T^2}{4 \times PD} \right)$$
$$ADDc = 0.503 \text{ mm}$$

Donde:

ADD: Altura de cabeza

PD: Diámetro de paso

T: Espesor circular

- **Profundidad de trabajo (WKG) mm**

Ecuación 4.28.

$$WKG = 2 \times ADD$$
$$WKG = 1 \text{ mm}$$

Donde:

ADD: Altura de cabeza

- **Ángulo de Diente en Grados**

Ecuación 4.29.

$$\alpha = \frac{T}{\frac{PD}{2}} \times \frac{180}{\pi}$$

$$\alpha = 1.935^{\circ}$$

Donde:

PD: Diámetro de paso

T: Espesor circular

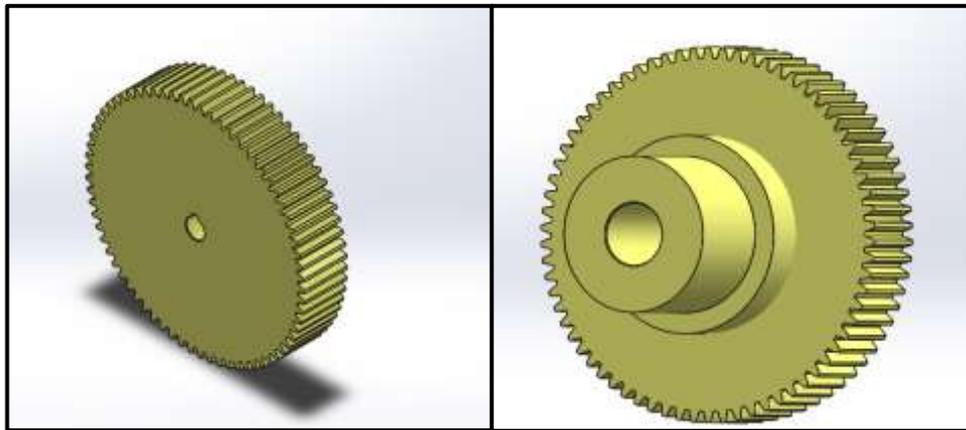


Figura 4.3 Engrane del Tren de Engranajes y Racha

4.1.3.3. *Distancia entre centros.*

Es la distancia que se encuentra entre el eje del piñón y el eje del engrane esta dimensión es la de mayor importancia en el ensamblaje del sistema.

Ecuación 4.30.

$$C = \frac{PDe + PDp}{2}$$

$$C=27.5$$

Donde:

C: Distancia entre centros.

PDe: Diámetro de paso del engrane

PDp: Diámetro de paso del piñón

(Mott, 2006)

4.1.3.4. Paso diametral.

El paso diametral es la relación entre el número de dientes del engranaje con su respectivo diámetro de paso, representa el número de dientes por unidad de longitud del diámetro del engranaje.

ENGRANE Y PIÑÓN

Ecuación 4.31.

$$L = \frac{N}{PD}$$
$$L=2$$

Donde:

L: Paso diametral

N: Número de dientes

PD: Diámetro de paso

4.1.3.5. Relación de contacto

La relación de contacto es cuando dos engranajes se acoplan por un diente y es ayudado por otro segundo, esta relación se usa para determinar el promedio de dientes que entran en contacto en la relación de transmisión de potencia, tomando en cuenta que el valor mínimo establecido esta entre 1,2 y 1,5 dependiendo del ángulo de presión.

Ecuación 4.32.

$$mf = \frac{\sqrt{Rop^2 - Rbp^2} + \sqrt{Roe^2 - Rbe^2} - C \operatorname{sen}\phi}{P \cos\phi}$$

Donde:

Rop es el radio exterior del piñón

Rbp es el radio del círculo de base del piñón

Roe es el radio exterior del engranaje

Rbe es el radio del círculo de base del engranaje

C es la distancia entre centros

P el paso circular

ϕ el ángulo de presión usado

(Mott, 2006)

RADIO EXTERIOR DEL PIÑÓN

Ecuación 4.33.

$$R_{op} = \frac{\text{Número de dientes del piñón} + 2}{2 \times \text{paso diametral}}$$

$$R_{op} = 4.5$$

RADIO EXTERIOR DEL ENGRANAJE

Ecuación 4.34.

$$R_{oe} = \frac{\text{Número de dientes del engranaje} + 2}{2 \times \text{paso diametral}}$$

$$R_{oe} = 23.75$$

RADIO DEL CÍRCULO DE BASE DEL PIÑÓN

Ecuación 4.35.

$$R_{bp} = \frac{\text{Número de dientes del piñón}}{2 \times \text{paso diametral}} \times \cos \phi$$

$$R_{bp} = 1.632$$

RADIO DEL CÍRCULO DE BASE DEL ENGRANAJE

Ecuación 4.36.

$$R_{be} = \frac{\text{Número de dientes del engranaje}}{2 \times \text{paso diametral}} \times \cos \phi$$

$$R_{be} = 9.487$$

RELACIÓN DE CONTACTO

Ecuación 4.37.

$$mf = \frac{\sqrt{Rop^2 - Rbp^2} + \sqrt{Roe^2 - Rbe^2} - C \times \text{sen}\phi}{P \cos\phi}$$

$$mf = 1.6977$$

La relación de contacto es cómodamente mayor al mínimo requerido corroborando los cálculos previos de engranajes realizados.

4.1.4. Síntesis de cálculos de diseño de engranes y piñones

La *tabla 4.3* describe los cálculos generales del diseño de engranajes y piñones del tren, como también los cálculos básicos de ensamblaje.

Tabla 4.3. Resumen de cálculos de diseño y ensamblaje

Datos de entrada.	Piñón	Engrane
Ángulo de presión (PA)	20,00	20,00
Número de dientes (N)	16,00	93,00
Módulo (MDL)	0,50	0,50
Diámetro de paso (PD)mm	8,00	46,00
Addendum (ADD) mm	0,50	0,50
Dedendum (DED) mm	0,579	0,579
Profundidad total (WD) mm	1,079	1,079
Holgura (CL) mm	0,079	0,079
Diámetro externo (OD) mm	9,00	47,50
Diámetro de raíz (RD) mm	6,843	45,343
Círculo base (BC) mm	7,518	43,696
Paso circular (CP) mm	1,571	1,571
Espesor circular diente (T) mm	0,785	0,785
Espesor de cabeza de diente (ADDc) mm	0,519	0,503
Profundidad de trabajo (WKG) mm	1,00	1,00
Ángulo del diente (grados)	11,250	1,935
	GENERAL	
Radio exterior del piñón (Rop)	4,5	
Radio del círculo de base del piñón (Rbp)	1,632	
Radio exterior del engranaje (Roe)	23,75	
Radio del círculo de base del engranaje (Rbe)	9,4879	
Distancia entre centros (C)	27,25	
Relación de contacto (mf)	1,69677	
Paso diametral(L)	2	

4.1.5. ANÁLISIS EN EL TREN DE ENGRANAJES.

Dentro de los cálculos de diseño del sistema mecánico cabe señalar algunas variables adicionales que corroboraran el diseño del sistema por ello se ha considerado las siguientes ecuaciones.

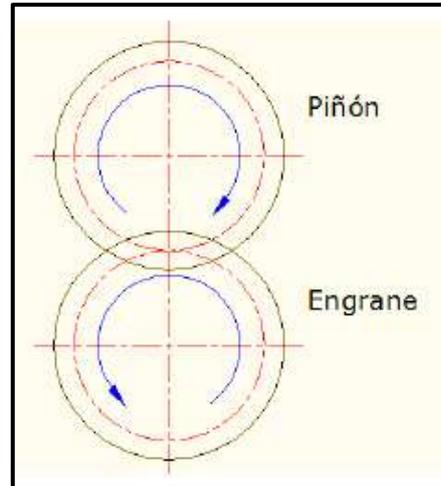


Figura 4.4 Diagrama de cuerpo libre piñón engranaje

Considerando la figura 4.3 se define el diagrama de cuerpo libre del engranaje

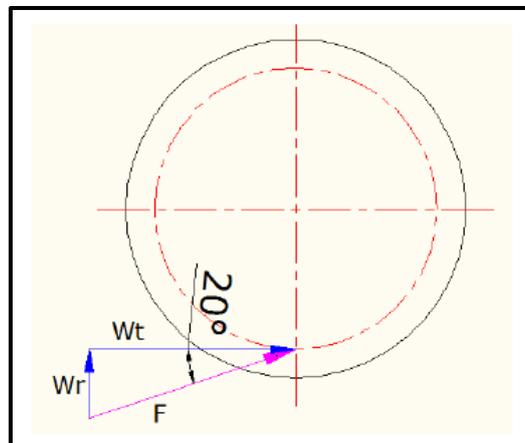


Figura 4.5 Diagrama de cuerpo libre engranaje

4.1.5.1. Interferencia

La interferencia tiene lugar cuando un diente de la corona entra en contacto con el del piñón en un punto no conjugado o por la acción de la propia materia, produciéndose una falla en la transmisión del movimiento un desgaste excesivo, una rotura de los dientes o una traba en el trabajo el sistema, se puede dar la interferencia por:

- Cuando no se cumple la Ley Fundamental.
- Cuando no hay rodadura en los engranajes.
- Cuando una superficie envolvente hace contacto con una NO envolvente.

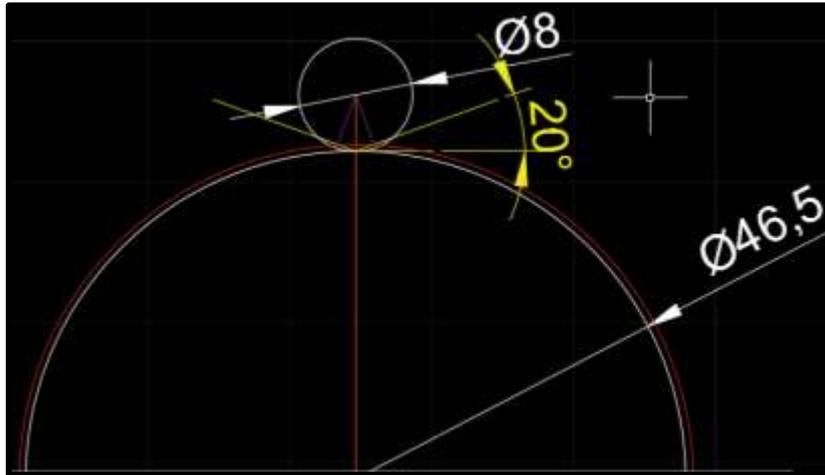


Figura 4.6 Interferencia del sistema en forma gráfica

4.1.5.2. Diseño estático

Para iniciar con el cálculo del diseño estático se debe conocer el concepto de **velocidad en la línea de paso** que es la velocidad lineal en un punto sobre el engranaje en el radio del círculo de paso. (Shigley J. , 2008)

Ecuación 4.38.

$$V = \frac{\pi x PD x Wear}{12}$$

$$V = 4.792 \frac{pies}{min} = 24.344 \frac{m}{s}$$

Donde:

V= velocidad en la línea de paso pies/min

PD= diámetro de paso expresado en pulgadas del engranaje

Wear = las revoluciones transmitidas por la rodilla expresado

4.1.5.3. Par transmitido

Para obtener el valor del par o F se considera el diagrama de cuerpo libre del engranaje expresado en la *figura 4.4* donde al obtener ya el valor de W_t por relaciones trigonométricas podemos obtener la fuerza F.

Ecuación 4.39

$$W_t = \frac{6000 H}{\pi d n}$$

$$W_t = 0.09 \text{ kN}$$

$$\cos 20^\circ = \frac{W_t}{F}$$

$$F = 0.096 \text{ kN} = 96 \text{ N}$$

Donde

W_t : Es el factor de fuerza en el eje x

H= fuerza que transmite la rodilla en KW (J. Maxwell , Veronica Naing, Qingguo Li, 2009)

4.1.5.4. Factores de influencia de Lewis

La ecuación de Lewis o sus factores de Lewis son datos establecidos para estimar el esfuerzo de flexión en los dientes de un engranaje.

Para el diseño del engranaje dado se considera que el factor es de 0.4436 tomando en cuenta el número de dientes y el ángulo de presión y realizando una interpolación lineal para obtener el factor para el engranaje de 93 dientes puesto que la tabla general de Lewis *Anexo A*, no contiene el número de dientes deseado

Tabla 4.4. Factor Y de Lewis

Número de Dientes	Factor Y o de Lewis	Ángulo de Presión
93	0.4436	20°

(Shigley J. , 2014)

4.1.5.5. Ecuación de esfuerzo AGMA

Tomando en consideración las recomendaciones del libro de Shigley las ecuaciones de esfuerzo de AGMA nos permiten determinar los esfuerzos que sufren o están sometidos los engranajes.

- **Esfuerzo de flexión:**

Ecuación 4.40.

$$\sigma = W_t \cdot K_0 \cdot K_v \cdot K_s \cdot \left(\frac{1}{m \cdot F} \right) \cdot \left(\frac{K_m \cdot K_B}{J} \right)$$

Donde:

σ	Esfuerzo por fatiga a tensión intermitente
W_t	Carga transmitida
K_0	Factor de sobrecarga
K_v	Factor dinámico
K_s	Factor de tamaño
K_m	Factor de distribución de carga
K_B	Factor de espesor del aro
MDL	Módulo del engranaje
F	Ancho de cara del diente
J	Factor geométrico

Par obtener el valor de esta ecuación se calcula cada uno de los coeficientes descritos a fin de obtener la respuesta necesaria y las diversas tablas descritas en el *Anexo A*.

- **Factor de Sobrecarga K_0**

El factor de sobrecarga se encuentra en el *Anexo A* considerando que la fuente de potencia es uniforme, por lo tanto K_0 tiene el valor de 1.00

- **Factor Geométrico J**

El factor geométrico se calcula de las tablas del *Anexo A* considerando una interpolación lineal ya que el número de dientes del engranaje no existe en la tabla del *anexo*.

$$J = 0.41$$

Para un engranaje de 93 dientes.

- **Factor Dinámico Kv:**

Ecuación 4.41.

$$kv = \frac{50}{50 + \sqrt{V}}$$

$$kv = 0.958$$

Considerando las condiciones de Nilón donde 50 es un valor constante.

- **Factor de Tamaño Ks**

Ecuación 4.42.

$$F = 4 \left(\frac{\pi}{CP} \right)$$

$$F = 8.00003 \text{ mm}$$

$$K_s = 1.1192 \left(\frac{F \times J}{CP} \right)^{0.0535}$$

$$K_s = 1.164$$

Donde:

F Cara del diente

J Factor Geométrico

CP. Paso Circular

- **Factor de Distribución de Carga K_m**

Considerando que el factor de distribución de carga depende de la anchura y la condición de soporte tenemos que para engranajes de ancho de cara ≤ 50 mm, el factor sujeto a engranajes de precisión es de 1.30

$$K_m = 1.30$$

- **Factor de Distribución del Aro K_B**

Con este factor se determina si la falla en un engranaje es por la fatiga a flexión del aro del engranaje y no necesariamente del diente. Este factor sirve para el ajuste del esfuerzo de flexión estimado en un engranaje.

Para engranajes solidos el valor de K_B se lo denomina por la unidad.

Con todos los factores encontrados se reemplazan en la ecuación 4.41 de esfuerzo a la fatiga.

$$\sigma = W_t \cdot K_0 \cdot K_v \cdot K_s \cdot \left(\frac{1}{m \cdot F} \right) \cdot \left(\frac{K_m \cdot K_B}{J} \right)$$

$$\sigma = 84.86 \text{ MN}$$

- **Esfuerzo de Contacto:**

Es el esfuerzo que puede sufrir el engranaje por fatiga a tensión de contacto intermitente.

La fórmula definida para este análisis está dada por el diámetro de paso el coeficiente elástico, el factor de superficie y el factor geométrico a la picadura.

Ecuación 4.43.

$$\sigma_c = C_p \left((W_t \cdot K_0 \cdot K_v \cdot K_s \cdot \left(\frac{K_m}{PD \cdot F} \right) \cdot \left(\frac{C_f}{I} \right)) \right)^{1/2}$$

Pero para aplicar son necesarios a más de los factores ya calculados y conocidos obtener factores complementarios para realizar el cálculo respectivo.

- **Coeficiente elástico C_p**

Para definir el esfuerzo de contacto es de vital importancia conocer el coeficiente elástico para ello se toma de las propiedades del nylon el módulo de elasticidad de Young y la relación de Poisson con las cuales se define la ecuación.

Tabla 4.5. Propiedades mecánicas del Nylon

Módulo de Young	2240.8 MPa
Radio de Poisson	0.39
Densidad	1.13 g/cm ³
Esfuerzo de Fluencia	58 MPa

Fuente: (U. Lanza, C.Müller-Karger, C. Graciano, 2006)

Ecuación 4.44.

$$C_p = \left[\frac{1}{\pi \left(\frac{1 - V_p^2}{E_p} + \frac{1 - V_G^2}{E_G} \right)} \right]^{1/2}$$

$$C_p = 20.50878 \text{ [MPa]}$$

Donde:

C_p : Coeficiente elástico.

V_p : Radio de Poisson del piñón.

V_G : Radio de Poisson del engranaje

E_p : Módulo de Young del piñón

E_G : Módulo de Young del engranaje

Se toma en cuenta que el engranaje y el piñón son del mismo material, por lo tanto, la relación de Poisson y el módulo de Young son los mismos.

- **Factor de Condición de Superficie C_f**

El factor de condición de superficie está dado por un acabado superficial, corte, esmerilado así también influye mucho los esfuerzos residuales y efectos de endurecimiento plástico, pero este coeficiente se considera a valores entre uno y superiores según lo dicta la norma AGMA. (Shigley J. , 2008)

$$C_f = 1$$

- **Factor Geométrico de resistencia a la picadura I**

Para definir el factor geométrico primero se tiene que conocer la relación de velocidad y la carga compartida que según las normas AGMA para engranajes rectos está dada por la unidad.

Ecuación 4.45.

$$m_N = 1$$

$$m_G = \frac{N_G}{N_P} = \frac{\text{Número de dientes del engranaje}}{\text{Número de dientes del piñón}}$$

$$m_G = 5.813$$

Definido los factores anteriores podemos establecer la ecuación de I.

$$I = \left(\frac{\cos \phi_t \cdot \text{Sen } \phi_t}{2m_n} \right) \left(\frac{m_G}{m_G + 1} \right)$$

$$I = 0.0273$$

Con todos los factores completos podemos definir la ecuación 4.44 de esfuerzo por fatiga o contacto intermitente.

$$\sigma_c = C_p \left((W_t \cdot K_0 \cdot K_v \cdot K_s \cdot \left(\frac{K_m}{PD \cdot F} \right) \cdot \left(\frac{C_f}{I} \right)) \right)^{1/2}$$

$$\sigma_c = 2.324 [MPa]$$

Siendo:

- C_p : Coeficiente elástico.
- W_t Carga transmitida
- K_0 Factor de sobrecarga
- K_v Factor dinámico
- K_s Factor de tamaño
- K_m Factor de distribución de carga
- F Ancho de cara del diente
- C_f Factor de Condición de Superficie
- I Resistencia a la picadura

4.1.5.6. Factor de Seguridad

Dentro de las normas tanto ANSI como AGMA se establecen dos factores de diseño uno conocido como factor de seguridad S_F , el cual define la protección del engranaje a la fatiga y el segundo factor es el de protección contra picaduras o S_H .

- **Factor de relación de dureza C_H**

Este factor esta dado principalmente por la diferencia de dientes que posee el piñón ya que al ser de menor cantidad de dientes está sometido a mayor número de ciclos o fases de tensión al contacto.

Cabe señalar que mediante el concepto de dureza Brinell se obtiene la relación de dureza basado en los datos del nylon de los Anexos A

$$\frac{HB_P}{HB_G} < 1.2$$
$$\frac{160}{160} < 1.2 = 1$$
$$C_H = 1$$

La dureza Brinell del Nylon es 70/160 según tabla de propiedades del Anexo A y en la tabla de factor de dureza del mismo Anexo se establece que C_H es igual a la unidad.

- **Factor de Confiabilidad K_R**

El factor de confiabilidad lo es seleccionable seleccionar de la tabla siguiente para una confiabilidad del 0.99.

Tabla 4.6. Factores de Confiabilidad

CONFIABILIDAD	K_R (Yz)
0.9999	1.50
0.999	1.25
<u>0.99</u>	<u>1.00</u>
0.90	0.85
0.50	0.70

Fuente: (Shigley J. , 2008)

$$K_R = 1$$

- **Factor de Temperatura K_T**

Según Shigley para temperaturas en engranajes rectos de hasta 120 °C se recomienda un $K_T = 1$.

- **Factor de tipo de carga a flexión Y_N**

Considerando el valor de 10^5 ciclos de vida útil y usando la gráfica del Anexo A de Factor de ciclo de esfuerzos se afirma que:

$$Y_N = 2.3194N^{-0.0538}$$

Ecuación 4.46.

Donde N es el número de ciclos considerado.

$$Y_N = 2.3194(10^5)^{-0.0538}$$

$$Y_N = 1.103$$

- **Factor de resistencia a la picadura Z_N**

De igual manera como el caso anterior consideraremos un valor de ciclo de 10^5 y basándonos en la gráfica del anexo A podremos tener que:

$$Z_N = 2.466N^{-0.056}$$

Ecuación 4.47.

$$Z_N = 1.138$$

- **Esfuerzo de contacto permisible S_t, S_c**

Teniendo en cuenta que para el material utilizado no existe la ecuación definida para este cálculo, se usa para tener como referencia y sobredimensionamiento a la ecuación del acero AISI 4140 expresado en el anexo A y con la consideración que la dureza Brinell aplicada es la del Nylon.

$$S_t = 0.568 H_B + 83.8 \text{ [MPa]}$$

Ecuación 4.48.

$$S_t = (0.568)(160) + 83.8 \text{ [MPa]}$$

$$S_t = 174.68 \text{ [MPa]}$$

$$S_c = 2.22 H_B + 200 [MPa]$$

$$S_c = (2.22)(160) + 200 [MPa]$$

$$S_c = 555.2 [MPa]$$

Con todos los factores se establece el factor de seguridad contra fallo de fatiga de flexión, y el fallo por picadura del engranaje.

$$S_H = \frac{S_t Y_N / (K_T K_R)}{\sigma}$$

$$S_H = 1.93$$

$$S_H = \frac{S_c Z_N C_H / (K_T K_R)}{\sigma_c}$$

$$S_H = 14.7$$

4.1.6. Síntesis cálculos del tren de engranajes

Con los cálculos de la siguiente tabla tanto de seguridad, fallo por picadura, esfuerzos y factores de diseño se observa que los engranes diseñados están dentro de los límites de tolerancia y resistencia, así también la fiabilidad y la seguridad al momento de generar la energía de cosecha de la caminata humana.

Tabla 4.7. Resumen cálculos del tren de engranajes

Par transmitido	96 N
Esfuerzo de flexión	84.86 MN
Esfuerzo de Contacto	20.50 MPa
Factor de relación de dureza	1
Factor de Confiabilidad	0,999
Factor de Temperatura	1 A 120°
Fatiga de flexión	1,93
Fallo por picadura	14,7

4.1.7. Sistema racha

Para lograr que el sistema coseche o recolecte energía solo en el sentido positivo del movimiento normal de la marcha humana, es decir en el paso de flexión a extensión se diseña un sistema de racha basado en la torsión que puede producirse en un muelle o resorte que une dos piezas el cual cuando es

forzado o contorsionado transmite el movimiento pero si el movimiento es inverso y no contrae el muelle y no hay paso de movimiento este sistema, este sistema es probado y altamente funcional en impresoras y copadoras de diversas marcas.

4.1.7.1. Engrane transmisor de fuerza.

Este engrane es el encargado de transmitir toda la fuerza al tren de engranajes consta del mismo número de dientes como características del engranaje del tren, con la variación de su eje que aloja al resorte de torsión, las magnitudes del acople de torsión son un cilindro de diámetro 15 mm y de alto 6 mm como también un cilindro de fuerza de 19 mm de diámetro, y 3 mm de alto, manufacturado en Poliamida 6 al igual que los engranes y piñones del tren.

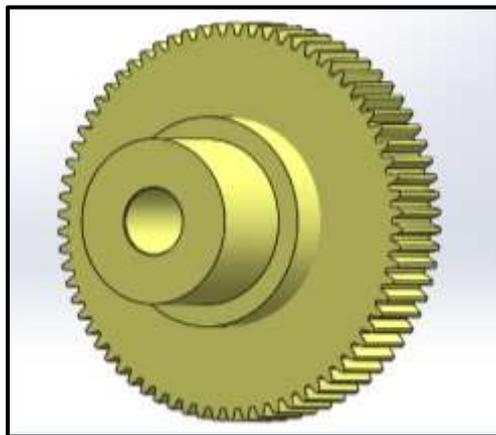


Figura 4.7 Engrane Transmisor de Fuerza

4.1.7.2. Resortes de torsión.

Los resortes de torsión son utilizados para percibir un momento torsional, al momento que la torsión se aplica las espiras del muelle se someten a una fuerza de flexión, en el mismo plano que actúa, el cual produce que el muelle se reduzca en su diámetro y para el caso puntual del sistema racha el muelle une las dos partes de la racha y transmite el movimiento.

El muelle seleccionado consta de una construcción poco tradicional de maquinado cuadrangular de acero aleado de espesor interno 15 mm, y espesor del material de 1 mm, genera un diámetro externo de 17 mm, adicional mente

tiene la muesca de torsión en el extremo superior de 3 mm de alto y una muesca de ayuda o soporte de forma cuadrada de 3 x 3 mm.

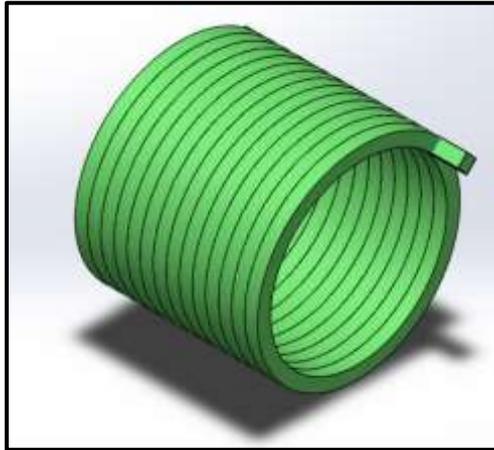


Figura 4.8 Muelle de torsión

4.1.7.3. Acople de transmisión de fuerza.

Es el elemento encargado de transmitir la fuerza, proveniente de la articulación de rodilla, comunica la fuerza al tren de engranajes, este acople está enlazado estrechamente al muelle de torsión. Es diseñado tal cual, para transmitir la fuerza enviada por la rodilla, consta de un cilindro de diámetro exterior de 15 mm y 6 mm de alto, cabe señalar que contiene dos muescas de encaje a las sujeciones y la entrada para el acople del muelle de torsión, por ser una pieza reciclada su material de construcción es plástico, pero para producciones posteriores podría ser creado de algún polímero resistente.

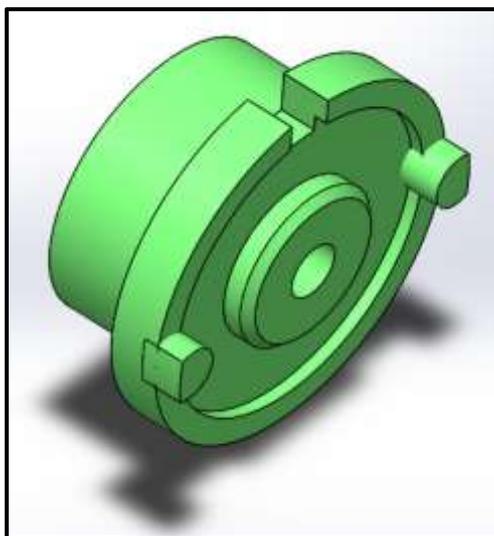


Figura 4.9 Acople transmisor

4.1.7.4. Sujeciones del Acople de transmisión y Palanca.

Dos acoplamientos de sujeción y de tensión son los encargados de brindar soporte y garantía para la transmisión de fuerza y a la vez sirven de unión del engrane de racha con el acople de transmisión.

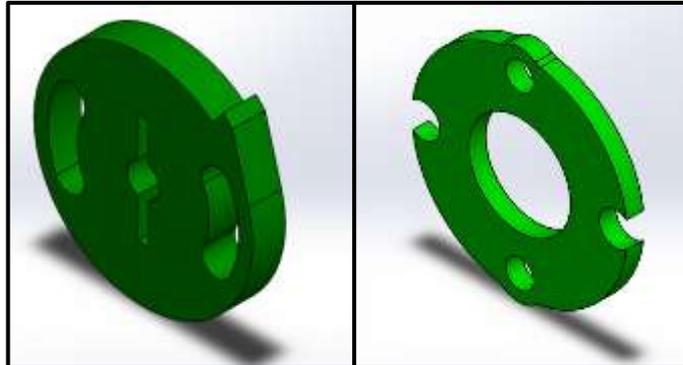


Figura 4.10 Sujeciones del Acople de transmisión y Palanca

4.1.7.5. Pin de sujeción

Es un pequeño pin de soporte y sujeción entre los acoples y el eje de transmisión sus dimensiones son de 2 mm de diámetro y 12 mm de largo su función es sostener al eje de entrada de la palanca y a su vez bloquear al eje cuando el resorte se comprima logrando así transmitir el movimiento deseado, fue seleccionado de esas dimensiones y material tomando en consideración como se explicó anteriormente es un sistema eficiente probado en impresoras y copiadora por tal motivo fue seleccionado por ser parte del sistema y cumple muy bien su función. No se vio pertinente realizar cálculos de diseño, esfuerzo o límites de ruptura debido a que el pin no soporta una gran cantidad de fuerza o tensión y no fue maquinado localmente, pero por sus características es de acero con un acabado de cromo y níquel.

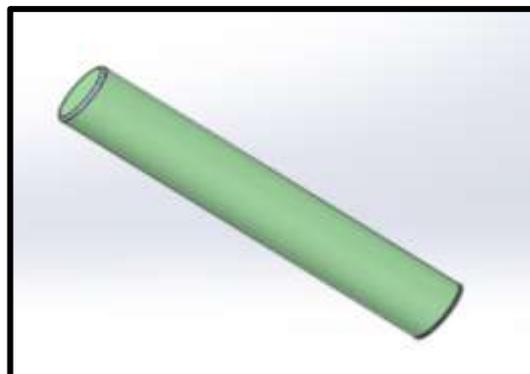


Figura 4.11 Pin de Sujeción.

4.1.7.6. Palanca de acople a la rodilla

La palanca de acople quizá es la parte fundamental del sistema, ya que es la encargada de transmitir la fuerza o tracción de la rodilla hacia el sistema, en si se encarga de cosechar la energía.

Para que el diseño sea agradable y atractivo se ha considerado realizarla en dos partes móviles con una dimensión de largo 60 mm y de espesor 4 mm, así también dos extremos circulares de radios 30 mm y 15 mm respectivamente y arcos de circunferencia, los cuales le dan una vista atractiva, el diseño de la palanca se tomó como base la utilidad, la estética, el peso, y las dimensiones considerando las restricciones anatómicas ya descritas anteriormente, Se decidió hacer una variación con respecto al prototipo (*Anexo C*) para acoplar el sistema de sujeción en la segunda parte de la palanca, para el prototipo fue construida en acrílico blanco de 4 mm.

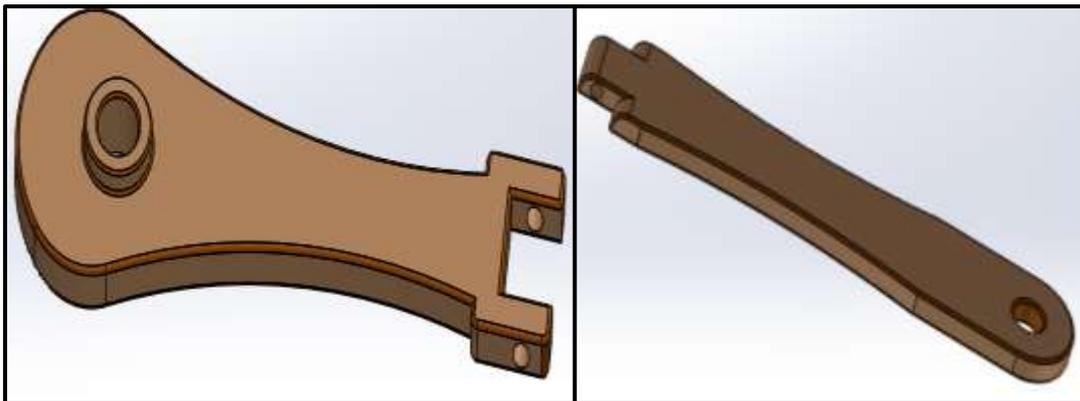


Figura 4.12 Palanca de acople a la rodilla

4.1.8. Carcasa y placa de sujeción

Son las encargadas de acoplar y ensamblar el sistema, consta de dos placas principales una superior y una inferior, como una auxiliar en el centro, la auxiliar consta de un orificio circular el cual brinda sujeción para el generador están constituidas de un espesor de 3 mm para no exceder el peso del sistema, construida de acrílico.

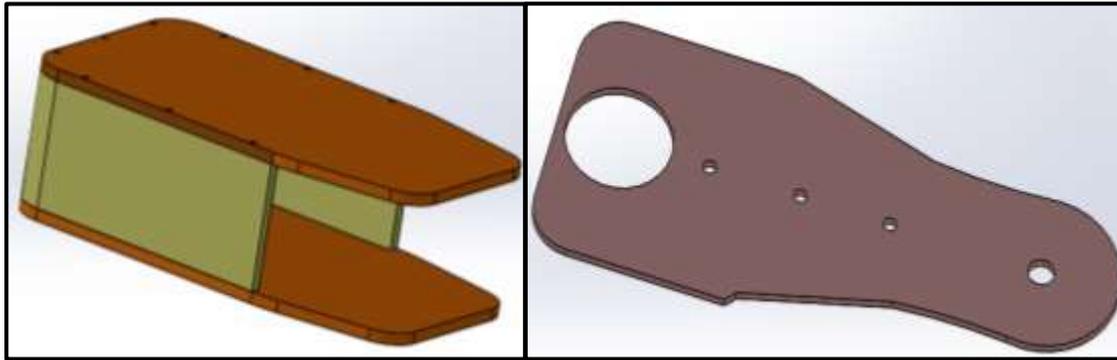


Figura 4.13 Carcasa y placa de sujeción

4.1.9. Sistema de sujeción

El prototipo y la idea inicial se consideraba un sistema mecánico acoplado a una rodillera de ortopedia, pero al usar el prototipo se consideró diseñar un sistema de sujeción acoplado al dispositivo de ahí la idea de crear dos abrazaderas a la medida de la persona con un orificio para una correa o un velcro de sujeción, las abrazaderas no se han manufacturado por ello no se ha tomado en cuenta el material de construcción, pero la mejor opción un polímero de alta resistencia.

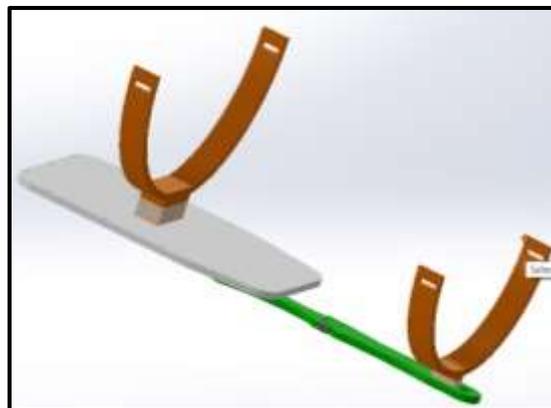


Figura 4.14 Sujeción

4.1.10. Ejes de transmisión

Los ejes son los encargados de soportar a los engranes y piñones del sistema, se han considerado de un diámetro exterior de 3 mm, debido a que el diámetro inferior de los piñones es de esta magnitud, se cree que soportaran la carga debido a que los pares de engranajes soportan muy poco torque, pero

altas velocidades lo que no sería un riesgo de ruptura, al contrario, se corre el riesgo de desgaste lógicamente considerando que el engrane es de un material más ligero.

El eje del sistema aislador o racha es de 6 mm en él se acopla la palanca de transmisión del movimiento, es decir es el encargado de soportar el torque de la marcha, y como se mencionó anterior mente el sistema de racha o limitador de ciclo fue basado o tomado como punto de partida del sistema de una impresora por lo que se decidió reutilizar esa idea y llevarla a nuestro proyecto por ello el eje no puede sobrepasar 6 mm, son manufacturados en hierro con terminado de cromo.

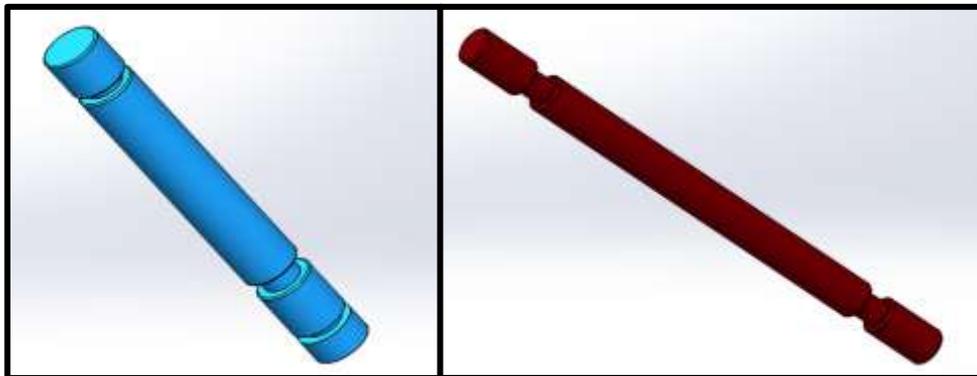


Figura 4.15 Ejes: Palanca Racha y Tren de engranes

4.1.11. Sistema mecánico recolector de energía mecánica.

El sistema mecánico está constituido de:

- Piñón de acople al generador
- Engrane multiplicador
- Piñón de acople multiplicador
- Engrane - Racha de accionamiento
- Sistema racha
- Ejes de rotación
- Placas de sujeción
- Bocines
- Retenes
- Cubierta o carcaza

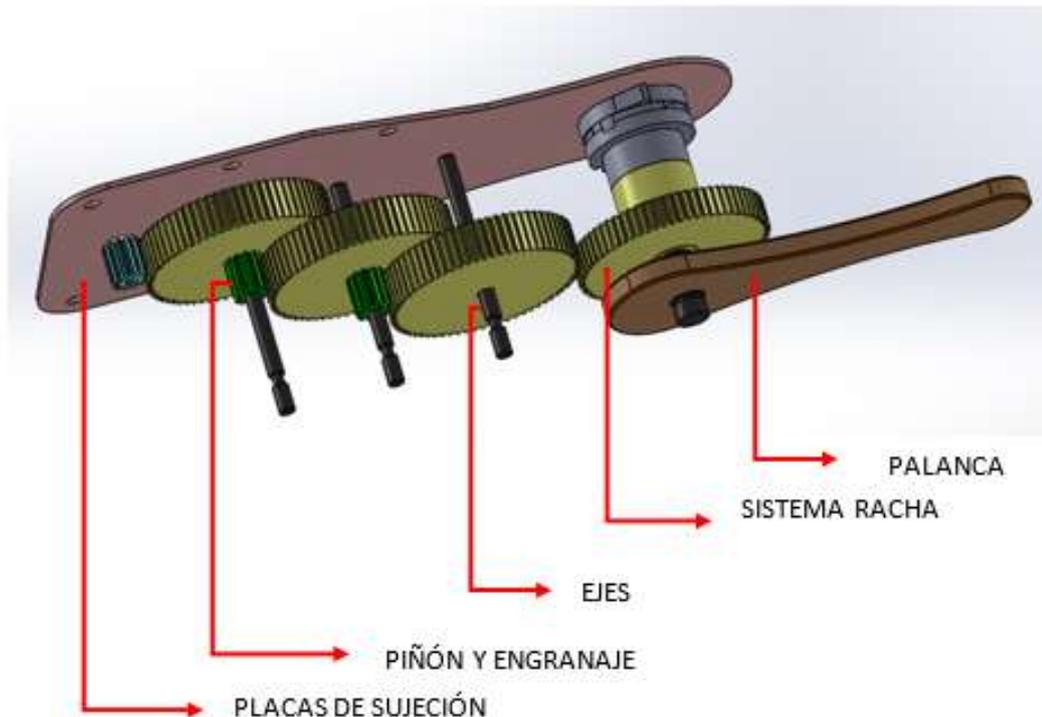


Figura 4.16 Sistema Mecánico y sus partes

4.2. DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

El tren de engranajes está complementado con el generador de energía, ya que este es el encargado de convertir el movimiento rotatorio, que brinda el tren de engranajes en energía utilizable, para recargar una batería por ello el generador y el sistema eléctrico electrónico es la segunda parte importante en el sistema.

4.2.1. EL GENERADOR

El generador es una máquina capaz de transformar la energía mecánica en energía eléctrica mediante la rotación y el campo magnético que producen sus componentes. (Educa, 2014)

El generador en estudio que se encargará de transformar la energía producida por la articulación y convertirla en energía eléctrica es un generador de marca Mabuchi Motor de serie RF- 310TA. (Mabuchi)

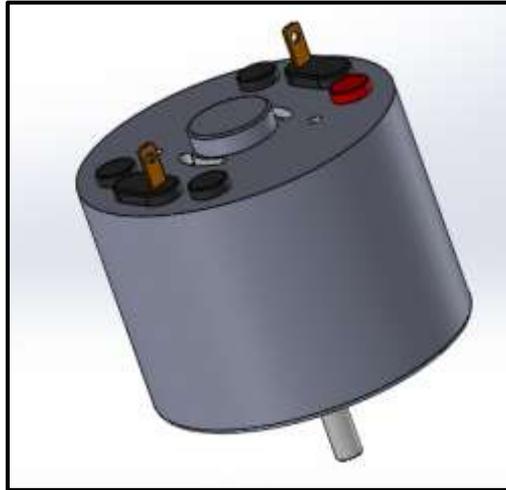


Figura 4.17 Generador Mabuchi Motor

4.2.2. CIRCUITO DE ACOPLA DEL GENERADOR A LA SALIDA

El circuito de acople recepta la tensión eléctrica producida por el generador y la lleva hacia la toma de salida ayudando así a tener una toma segura y protegiendo a la batería a cargar, costa de un circuito básico con protecciones de un diodo zener, un diodo rectificador y un transistor npn con una alta ganancia en corriente en sistemas Dc. (TECHNOLOGIES)

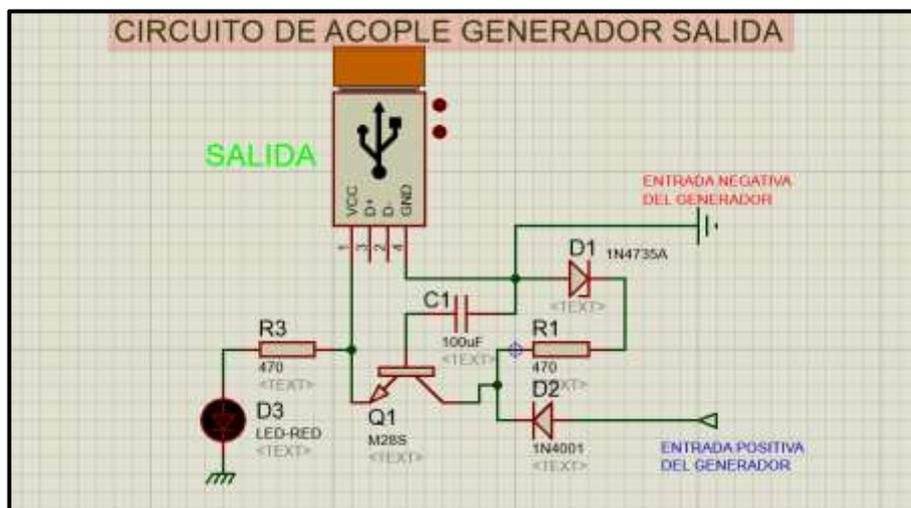


Figura 4.18 Circuito Acople Generador Salida

4.2.3. CIRCUITO DE CARGA DE BATERÍA.

Para hacer un barrido de carga y descarga de la batería el chip LP2951 mide el estado de la misma por medio del pin (FeedBack) el cual lleva la información del nivel de carga, si llego al nivel máximo se suspende o si no se genera la orden para seguir suministrando hasta que la batería este cargada, además se cuenta con un filtro el cual elimina la inestabilidad. Puede ser alimentado el circuito desde 4.10 V hasta 10 V o 1.5 veces la capacidad de la celda de carga (Simpson, Chester, Texas Instruments)

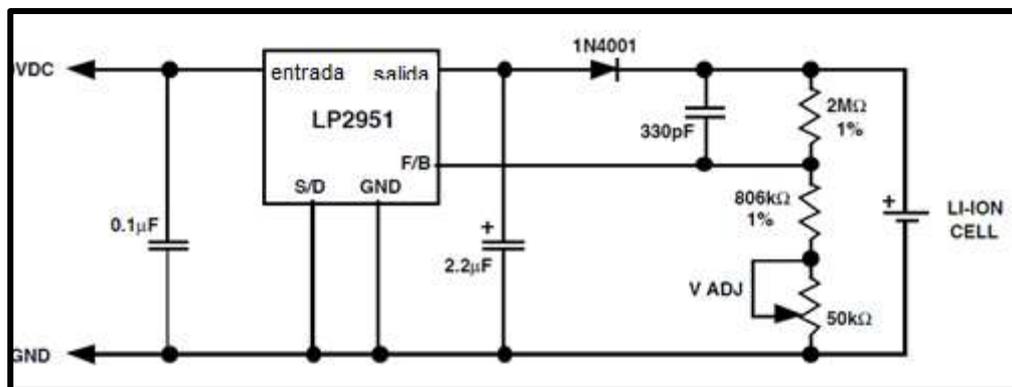


Figura 4.19 Circuito de Carga

Fuente: (Simpson, Chester, Texas Instruments)

4.2.4. BATERÍA

Es la parte medular de este estudio encargada de almacenar toda la energía producida por el sistema para generar el suministro a smartphones, mp3 y elementos electrónicos de una prótesis.

La batería que hemos seleccionado para facilidad, es una batería marca LG que brinda 2600 mAh se alimenta con 5 V y genera un voltaje de salida de 5V.



Figura 4.20 Batería

Fuente: (bateriasdelitio, 2014)

4.3. MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

Luego de conocer todos los cálculos pertinentes al sistema mecánico y eléctrico así también el diseño analizado, podemos establecer un modelo científico matemático el cual permitirá a futuras investigaciones continuar a partir de ecuaciones y modelos ya establecidos, para ello debemos obtener variables no consideradas en los cálculos anteriores los cuales nos permitirán llegar al modelo ideal matemático.

4.3.1. Revoluciones de Ingreso al Generador.

Para este cálculo necesitamos obtener el equivalente de la relación de transmisión entre los engranajes conductores y conducidos.

Ecuación 4.49.

$$eeq = \frac{\text{producto de los conductores (dientes)}}{\text{producto de los conducidos (dientes)}}$$

$$eeq = 198.496$$

$$RPM\ in = eeq \times rpmr$$

$$RPM\ in = 1984,96\ rpm$$

Rpmr = revoluciones por minuto suministradas por la rodilla tomado de la Ecuación 3.1 (Shigley J. , 2014)

4.3.2. Torque de Entrada al Generador

Conocidos los rpm de entrada al generador en cada paso de la marcha es importante conocer cuál es el torque que va a soportar el generador en el desarrollo de la recolección de energía.

Ecuación 4.50.

$$\tau = et \times Fin$$
$$et = \frac{1}{eeq}$$
$$et = 0.00503788$$

$$\tau = 0.0503788 \times 50Nm$$
$$\tau = 0.25189 Nm$$

Torque de la rodilla = 50 Nm

(Bertha Catalina Punin Sigcha, Maria Augusta Flores, Fernando Urguiles,)

4.3.3. Potencia Mecánica de la Rodilla y Entrada al Generador

Con los datos de torque y velocidad tanto de la rodilla como al salir del tren de engranajes podemos establecer la potencia mecánica y según los valores resultantes establecer matemáticamente si ha existido una pérdida de energía al pasar por los engranajes cabe señalar que se ha considerado despreciable el rozamiento por las características del material antes explicado.

Ecuación 4.51.

Rodilla

$$P = Fin \times rpmr$$
$$P = 500 W$$

Entrada al Generador

$$P = \tau \times RPMin$$
$$P = 500.008 W$$

Con los datos obtenidos podemos complementar un aumento de revoluciones que es el objetivo del tren de engranajes y una disminución considerable del torque, pero sin tener una pérdida de energía o potencia lo que garantiza que el sistema esta balanceado para un trabajo óptimo.

4.3.4. Modelo matemático del generador.

El generador como se trató en capítulos anteriores es el encargado de transformar la energía mecánica en energía eléctrica, para el Generador DC de la investigación no fue posible encontrar un modelo matemático mediante fórmulas pre establecidas o diseñadas por investigadores o científicos, por lo que se tomó la idea de obtener energía impulsado al generador con un motor controlado por PWM (modulación de ancho de pulso), el cual varia la velocidad del motor y modifica la salida en voltaje generado.

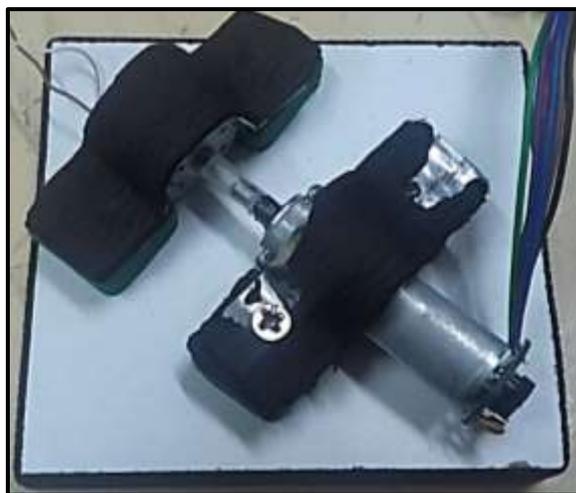


Figura 4.21 Motor y Generador DC para pruebas

Para la recolección de la muestra tanto de revoluciones de entrada al motor como el voltaje de salida del generador es de vital importancia usar una tarjeta myDAQ, y un driver L293D para controlar al motor con el ordenador y tener datos precisos en la muestra sujeta a análisis.

El motor de 12 V de serie IG220019X00015R posee un encóder magnético incremental el cual permite obtener el conteo de rpm enviadas al generador que posteriormente son señales de voltaje todo esto es posible por la interacción del software LabVIEW que permite visualizar dichos cambios en tiempo real en el ordenador.

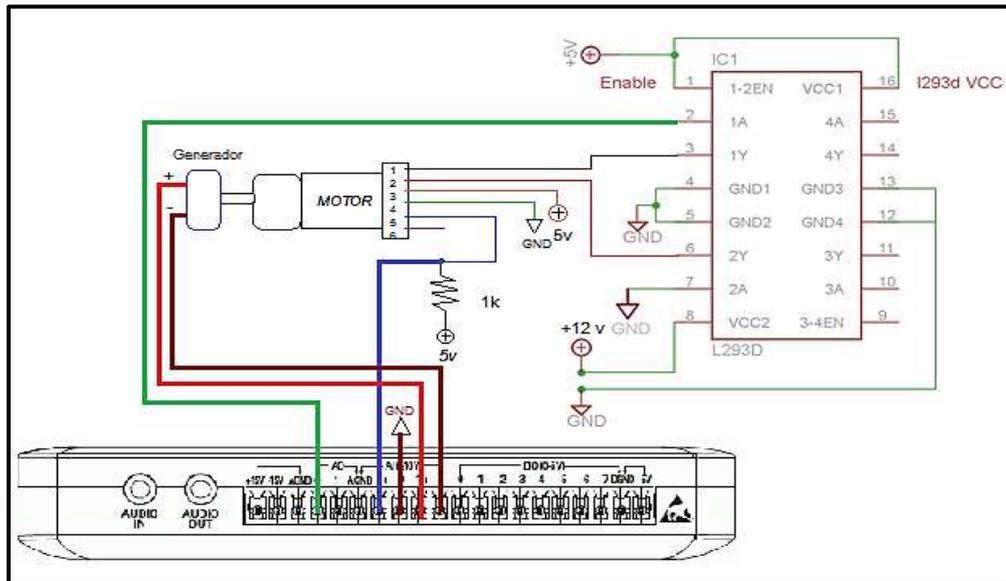


Figura 4.22 Conexiones eléctricas driver L293D, myDAQ, motor y generador

NI myDAQ es un dispositivo de adquisición de datos que brinda la oportunidad de medir y analizar señales; en esta investigación usamos los puertos AI en los pines 1+,1- para medir el voltaje de generación y 0+ para control del motor conjuntamente con el pin 0 del puerto A0.

De la misma manera el driver L239D sirve de puente de control entre el motor y la myDAQ para controlar los rpm enviadas al motor.

4.3.4.1. Muestreo

Para tener una muestra significativa se toman cien datos a distintas revoluciones por minuto de entrada y los respectivos voltajes de salida del generador obteniendo así las primeras curvas de generación de voltaje y rpm de entrada.

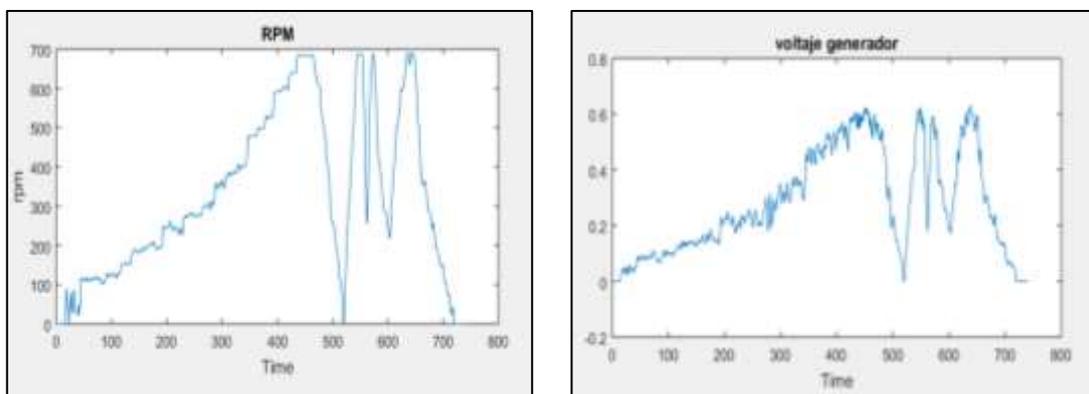


Figura 4.23 RPM de Entrada Vs Voltaje Generado

Con los datos obtenidos se envían al software de entorno matemático Matlab para obtener el modelo matemático más próximo al comportamiento de la planta para ello se usa la herramienta “ident” cuya función es identificar el sistema, y tener la posibilidad de obtener 3 o más funciones similares o aproximadas al comportamiento de la planta analizada basándose en las teorías de polos y ceros.

Tabla 4.8. Datos de Muestreo

RPM	VOLTAJE
0	0,0013
0	0,0011
0	0,00095638
0	0,00052088
0	0,00052088
0	0,0057
26,6997	0,0246
49,1208	0,0431
66,4443	0,0584
74,297	0,0623
89,9112	0,0678
112,573	0,0726
112,404	0,0717
117,899	0,0789
115,487	0,0813
119,422	0,0905
117,329	0,0933
120,706	0,0988
126,794	0,0982
125,233	0,0948

La herramienta “Ident” proporciona tres funciones de transferencia considerando el número de polos y ceros que convengan para tratar de obtener la función de transferencia más idónea o de mayor porcentaje de estimación al trabajo que realiza el generador.

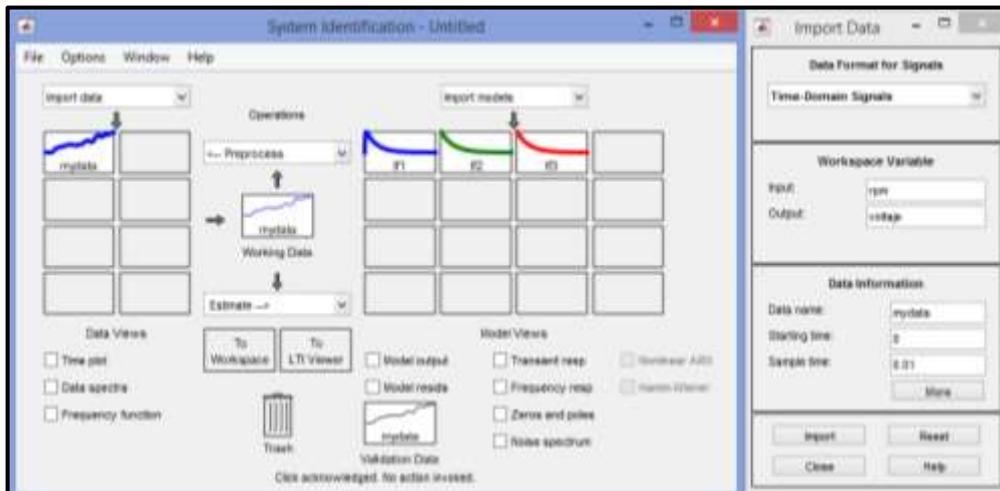


Figura 4.24 Entorno función “ident” de Matlab.

4.3.4.2. Función de transferencia idónea

Con la identificación del comportamiento de la planta el software se genera tres opciones de elección con las siguientes características:

Función de transferencia 1

Nº de polos: 1

Nº de ceros: 0

% de estimación: 88.7%

$$\frac{0.1037}{s + 121}$$

Función de transferencia 2

Nº de polos: 1

Nº de ceros: 1

% de estimación: 88.9%

$$\frac{0.0002339 s + 0.07257}{s + 85.75}$$

Función de transferencia 3

Nº de polos: 2

Nº de ceros: 0

% de estimación: 88.98%

$$\frac{336.4}{s^2 + 3280 s + 3.923e05}$$

Con las características y exactitud en la estimación la función de transferencia que más se asemeja al comportamiento del generador DC es la función número tres a la cual se puede discretizar utilizando c2d de MATLAB. Cabe recalcar que el método que utiliza este comando es el retenedor de orden cero (zoh). Además, se le establece el tiempo de muestreo que se lo estableció en el programa LabVIEW el cual es de 10 ms.

```
s = tf('s');  
G0 = 336.4/(s^2+3280*s+3.923e5)  
Z0 = c2d(G0,0.01)
```

Z0 =

$$\frac{0.0006 z + 1.014e-05}{z^2 - 0.2885 z + 5.701e-15}$$

Con la función discretizada se reprogramar LabVIEW y se obtiene un comparativo del voltaje de salida del generador en el muestro y el voltaje de salida mediante el régimen de comportamiento de la tf discretizada.

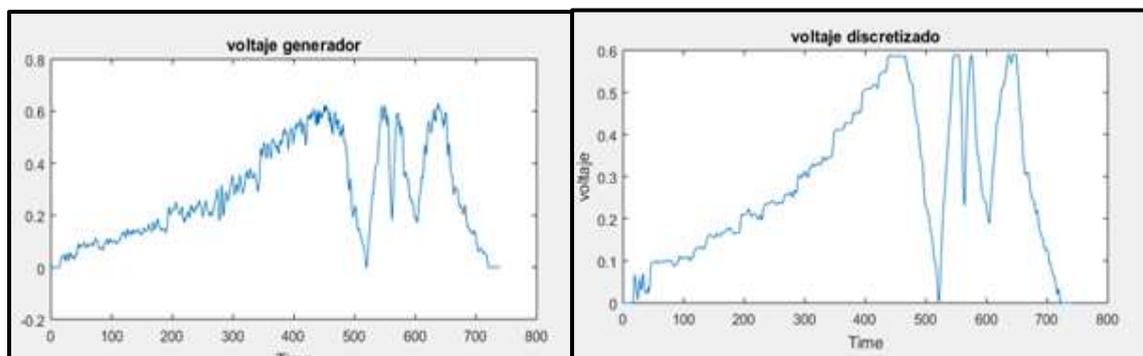


Figura 4.25 Señal de voltaje del generador.

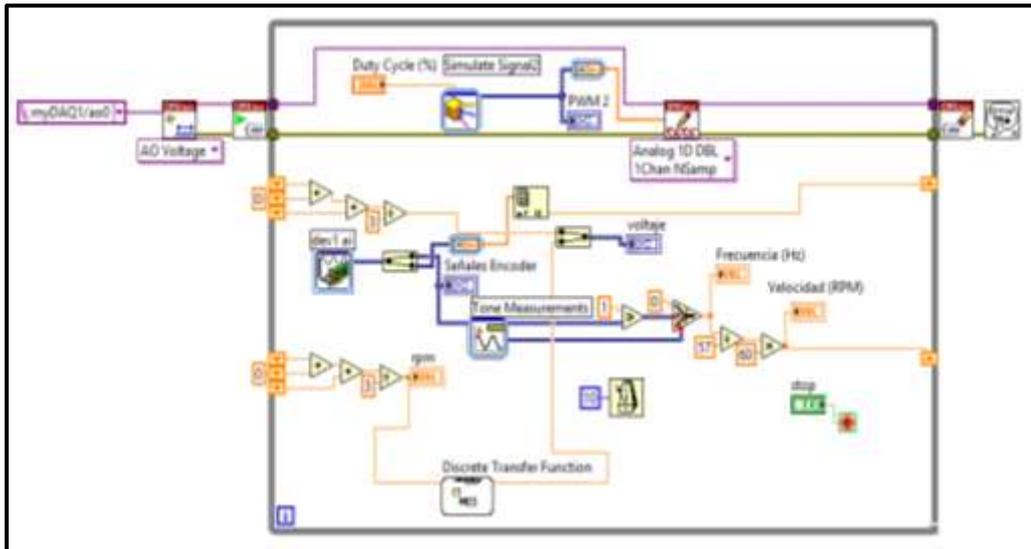


Figura 4.26 Entorno LabVIEW.

4.3.5. Modelo matemático del tren de engranajes.

Considerando las características mecánicas del Nylon se considera que la fricción y el rozamiento son despreciables pues no se produce un desgaste excesivo en este material y la función de transferencia o modelo matemático se basa en la iteración de la relación entre dientes de cada piñón conductor y conducido y la variación de rpm de la entrada de la rodilla y la amplificación a la entrada del generador.

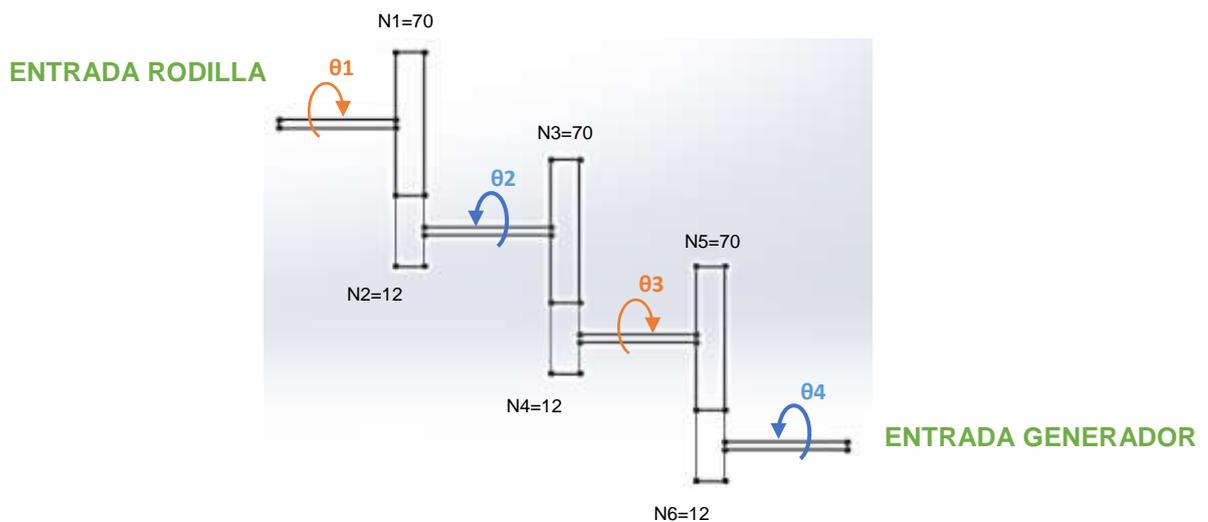


Figura 4.27 Tren de engranajes

Para el primer par de engranes la relación de la velocidad angular de salida está dada por la variación de la velocidad angular de entrada más la relación del engranaje conductor sobre el conducido.

Ecuación 4.52.

$$\theta_2 = \frac{N_1}{N_2} \theta_1$$

De la misma manera como la relación anterior la velocidad angular tres está definida por la salida del eslabón más la relación de sus engranes.

Ecuación 4.53.

$$\theta_3 = \frac{N_3}{N_4} \theta_2$$

Pero se podría sustituir la ecuación 4.53 en la 4.54 y obtener la relación entre la entrada del primer eslabón y la salida de la tercera velocidad angular.

Ecuación 4.54.

$$\theta_3 = \frac{N_1 N_3}{N_2 N_4} \theta_1$$

Para el último eslabón la relación es igual que las anteriores y de la misma manera la unión de las ecuaciones anteriores genera la ecuación ampliada.

Ecuación 4.55.

$$\theta_4 = \frac{N_5}{N_6} \theta_3$$

Ecuación 4.56.

$$\theta_4 = \frac{N_1 N_3 N_5}{N_2 N_4 N_6} \theta_1$$

4.3.6. Modelo matemático del suministro de energía para una prótesis biomecánica de rodilla aprovechando la energía mecánica.

Una vez determinado el modelo matemático del generador Dc y del tren de engranajes se define el modelo matemático del sistema completo partiendo de la rodilla hasta la salida eléctrica del sistema.

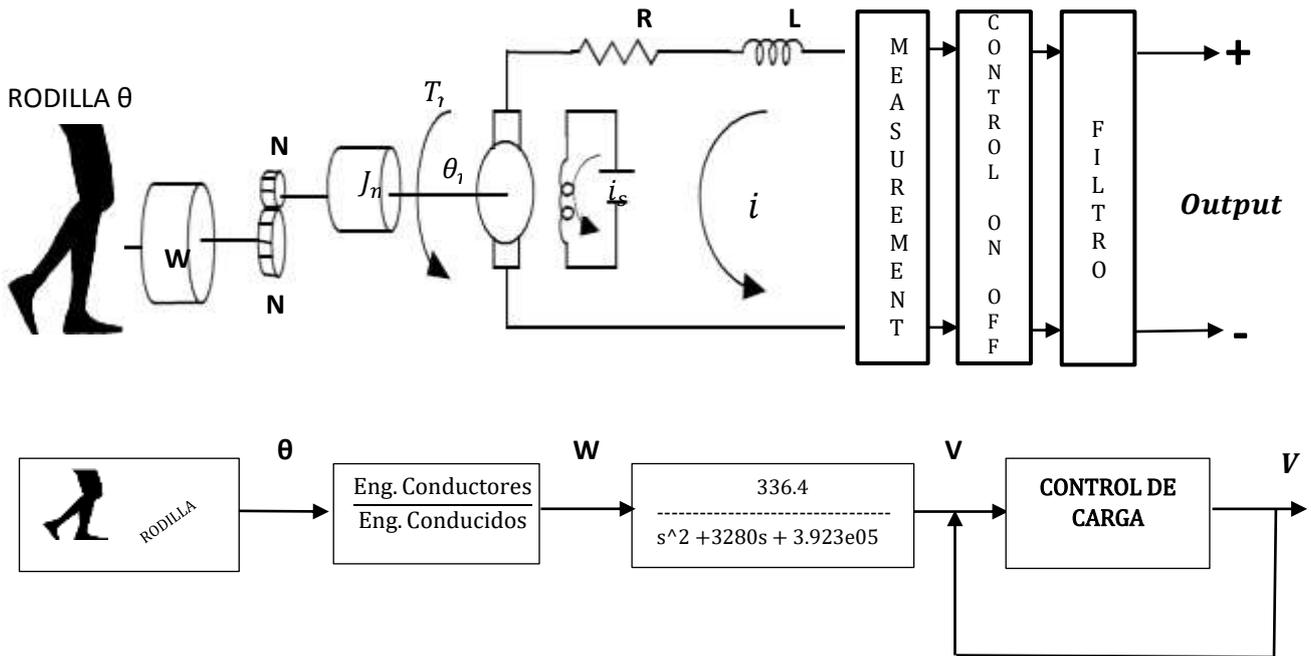


Figura 4.28 Modelo matemático del sistema

La figura 4.26 parte A muestra el modelo del sistema el con la conversión del ángulo de generación de la rodilla a velocidad angular, luego esta velocidad es amplificada por el sistema mecánico y enviar en óptimas condiciones al sistema de generación de energía (generador), produciendo energía suficiente para cumplir el objetivo propuesto en la investigación , seguido de la parte de lectura de carga en donde analiza el sistema si la batería está completamente cargada y si no lo esta se sigue proporcionando carga hasta cumplir la carga completa, finalmente el filtrado de la energía generada mejorar la calidad de energía de suministro y carga de la batería.

La figura 4.26 parte B muestra el modelo en bloques de la función de transferencia en los diversos procesos mecánico eléctrico y la realimentación en el caso de una falta de carga en la batería.

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan las pruebas y resultados obtenidos luego de la fabricación del prototipo generador de energía utilizando métodos mecánicos, tomando en consideración que se utilizó elementos sustitutivos por falla de maquinado de los elementos diseñados, se realizó mediante software una prueba concluyente. (*Anexo C*)

5.1. OBJETIVOS DE LA PRUEBA.

La misma fue realizada tomando en consideración un estudio experimental del prototipo de generador de energía, para evaluar su comportamiento. La cual ayuda a verificar si el prototipo posee la resistencia mecánica suficiente para ser sometido a la fabricación definitiva o al rediseño respectivo.

5.2. PRUEBA MECÁNICA.

5.2.1. ANÁLISIS MEDIANTE SOFTWARE

Para hacer un análisis se utiliza SolidWorks el cual permite realizar el análisis del sistema o de las partes más críticas usando el método de los elementos finitos en donde el sistema es sub dividido en muchas partes para analizarlos individualmente y luego en conjunto y predecir un posible comportamiento del sistema.

Para este sistema se analizan las partes más críticas como son el piñón y el engranaje, los cuales son los elementos sometidos a trabajo.

5.2.2. ENGRANAJE DEL TREN.

Para este engranaje se genera una malla muy fina ya que los dientes del engranaje son muy pequeñas y no se podría divisar lo que sucede.

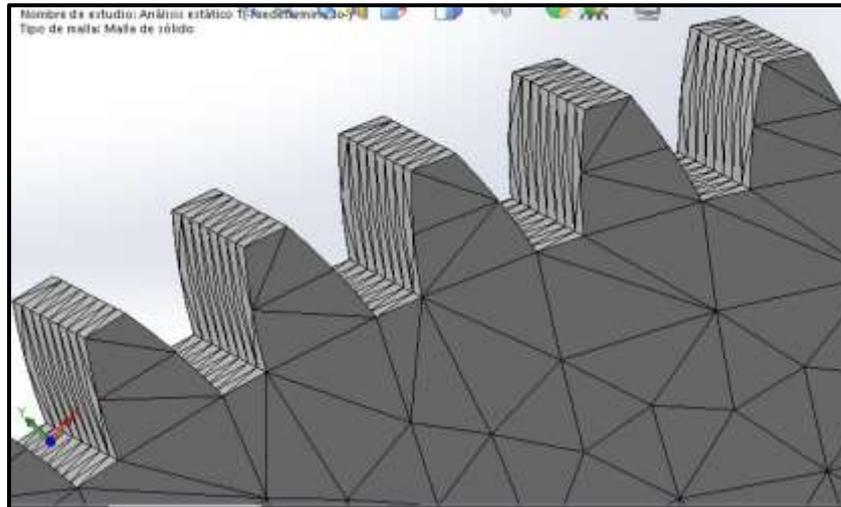


Figura 5.1 Mallado engranaje

Una vez realizado el mallado se obtiene el resultado que quizá podría dañar el elemento, si se observa la *figura 5.2* los diente pueden sufrir deformaciones irreparables

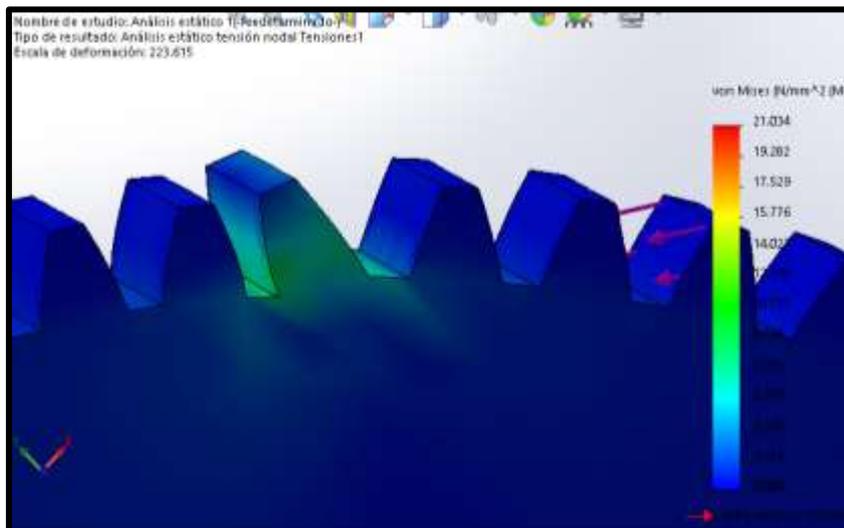


Figura 5.2 Von Mises

Según la predicción del software se observa que el elemento podría sufrir daños en las paredes de los dientes, como también en el acople al eje.

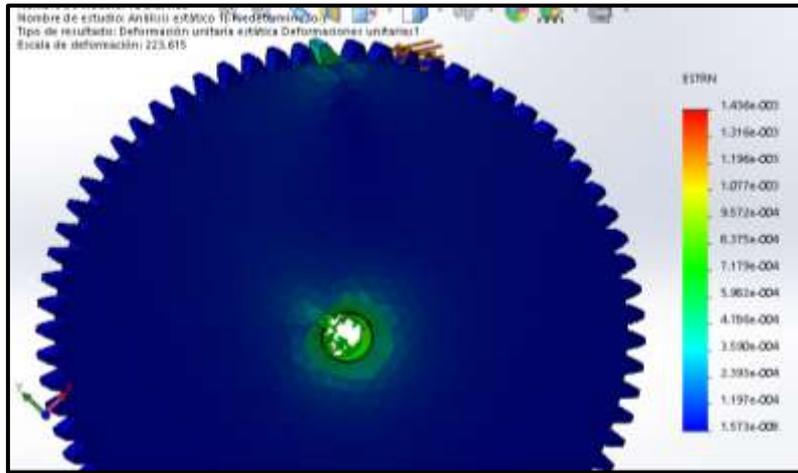


Figura 5.3 Deformaciones

5.2.3. PIÑÓN.

Para el piñón e igual que el engranaje se realiza un mallado muy fino el cual nos permite observar los posibles problemas que podrían ocurrir en el trabajo en si del tren de engranajes.

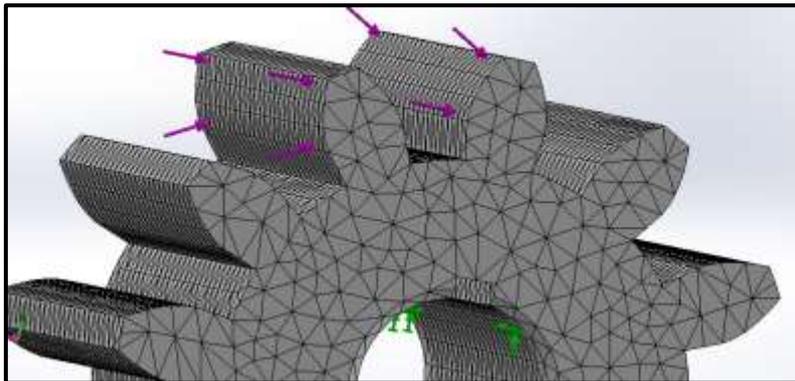


Figura 5.4 Mallado piñón

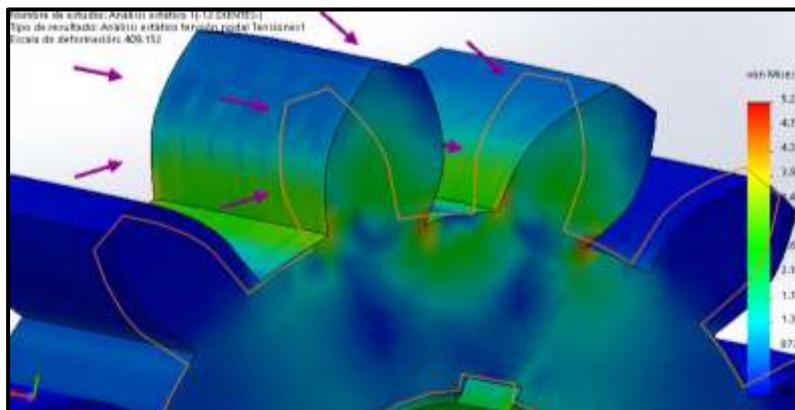


Figura 5.5 Análisis de Von Mises en el piñón

Lo que se observa con este análisis es que el piñón podría sufrir daños y deformaciones irreparables considerando que para el análisis se realizó con una fuerza de 25 Newton y 5 Newton tanto en el engranaje como en el piñón, valga decir que estas fuerzas han sido inferiores al torque máximo que una rodilla puede generar, pero como se puede observar los problemas y deformaciones a magnitudes inferiores no posee complicaciones. (Alon Cervera, 2016)

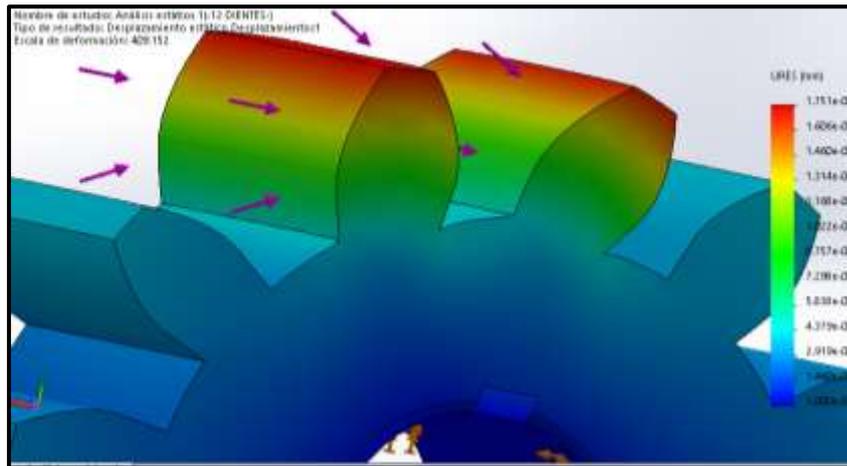


Figura 5.6 Análisis de desplazamiento en el piñón

Durante la realización del prototipo (*Anexo C*) para pruebas se tuvo muchos problemas en la fabricación de las tapas de soporte se utilizó un material muy delgado el cual limitó mucho la construcción, tomando en cuenta esta experiencia se pudo solucionar utilizando el mismo material, pero de mayor espesor.

Al montar el sistema para las pruebas de generación de energía se ha tenido un gran inconveniente en el maquinado de los engranajes y piñones ya que se lo ha realizado de forma artesanal en la ciudad de Ibarra, y no se cuenta en el entorno con un centro de mecanizado con tecnología de punta por ello se ha producido demoras en la evaluación del prototipo así también como fallas no contempladas y corroboradas en los cálculos de los elementos utilizados.

Los engranes al sufrir desgaste y roturas en las primeras evaluaciones nos llevó a realizar una revisión de cálculos ya antes realizados, considerando el maquinado local, se decidió reemplazar los engranajes rotos y deformados por engranajes similares para continuar con las pruebas requeridas hasta obtener

resultados significativos, pero no fueron concluyentes las pruebas, por ese motivo no se cuenta con un análisis a fondo del prototipo.

Lastimosamente no existe en la ciudad ni en el entorno un centro que pueda realizar un maquinado de buena calidad para los engranajes por lo que las pruebas confirmativas de generación fueron concluidas por software.

5.3. PRUEBAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA POR SOFTWARE.

Con engranajes de reemplazo se procedió a evaluar primero si el prototipo (*Anexo C*) generaba energía, el cual resultado altamente positivo y esperanzador ya que se logró llegar a producir de 1 a 1.2 voltios en las condiciones descritas anteriormente, las cuales no son las ideales para evaluar el sistema al 100%.

Con estas primeras pruebas se pudo observar que la energía producida por el dispositivo es buena y aprovechable para energizar ciertos elementos electrónicos y así también suministrar energía para cargar una batería, Cabe señalar que para evaluar otros parámetros de generación fue imposible por la calidad del maquinado de los engranes.

Se parte de conceptos tratados anterior mente con la zona de generación en la marcha humana donde mediante la curva del movimiento de una persona promedio se puede identificar fácilmente el consumo y generación de energía en una persona.

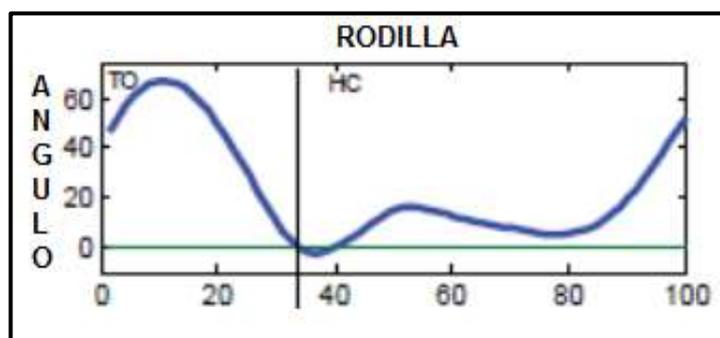


Figura 5.7 ángulo de recolección

Fuente: (J. Maxwell , Veronica Naing, Qingguo Li, 2009)

Considerando que el proceso de flexo-extensión no requiere un esfuerzo de la persona es la zona ideal para recolectar energía ya que al dar el paso genera un alto torque y esa es la condición ideal para recolectar.

5.3.1. GENERACIÓN DE ENERGÍA EN UN PASO

Tomando en consideración lo anterior se puede afirmar que la generación de energía con el sistema propuesto es garantizada, si se analiza un solo paso en la marcha se puede observar en la *figura 5.8* que representa el voltaje vs revoluciones por minuto de entrada es alta mente ascendente ya que a medida que se aumenta las revoluciones y el ángulo de ataque o generación, el voltaje va aumentando llegando a tener un voltaje de 1,7 en un solo paso y a condiciones ideales corroborando las pocas pruebas realizadas con el prototipo (*Anexo C*) fueron correctas si se considera que no fueron realizadas con engranajes ideales.

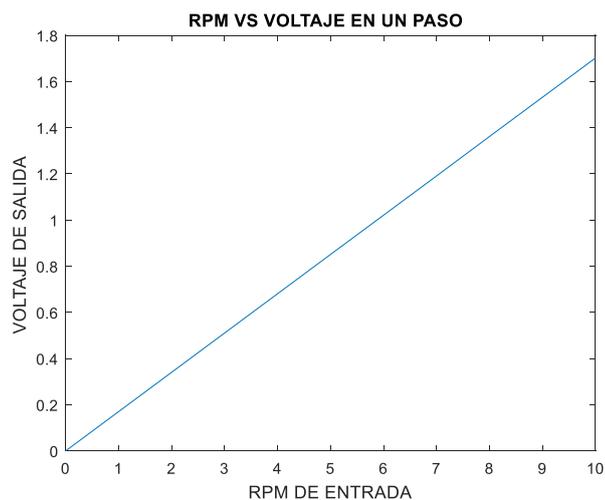


Figura 5.8 Voltaje vs RPM en un paso

Si se considera que en una marcha o caminata se producen muchos pasos y por ello muchas rpm seguidas producirá una multiplicación de rpm y un aumento de voltaje, lógicamente con una pérdida en el cambio de ciclo de caminado pero las estimaciones generadas en la experimentación y el modelo matemático se puede tener una gráfica de generación en 10 pasos seguidos a una marcha normal obteniendo 11.9100 rpm a la salida del tren de engranajes y generando un voltaje de 10.21 V suficiente para alimentar de energía a circuitos electrónicos y generar carga para una batería, en la tablas siguientes podremos

observar los valores de experimentación de rpm y voltajes generados así también el estimado en pérdidas de un 5% en el cambio de ciclo.

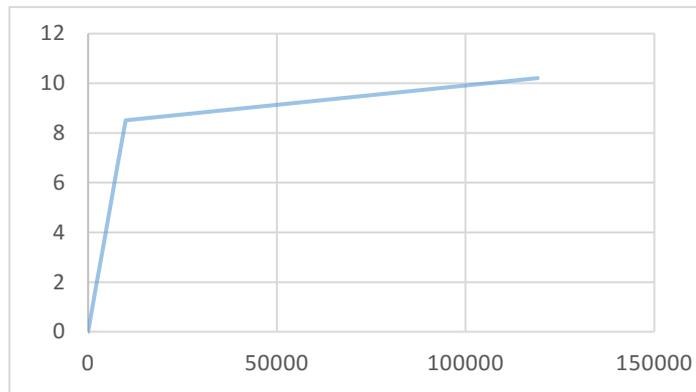


Figura 5.9 Voltaje vs RPM tren de engranajes

Tabla 5.1. RPM VS Voltaje

PASOS	RPM ENTRADA	RPM TREN	V GENERADO	PERDIDA CAMBIO CICLO
0	0	0	0	0
0,1	1	198,5	0,1702	0
0,2	2	397	0,3404	0
0,3	3	595,5	0,5106	0
0,4	4	794	0,6808	0
0,5	5	992,5	0,8511	0
0,6	6	1191	1,021	0
0,7	7	1389	1,191	0
0,8	8	1588	1,362	0
0,9	9	1786	1,532	0
1	10	1985	1,702	0
2	20	3970	3,404	3,2338
3	30	5955	5,106	4,8507
4	40	7940	6,808	6,4676
5	50	9925	8,511	8,08545
6	60	119100	10,21	9,6995

RESULTADOS

Los resultados que podemos observar en este proceso son

- Daño y deformación del tren de engranajes por mal maquinado local
- Se obtuvo valores de voltaje de entre 1 y 1.2 Voltios los cuales fueron apreciados con la ayuda de un kit NI myDAQ en el prototipo y de 1.2 a 1.7 voltios mediante software
- Se logró el objetivo de un diseño llamativo y no ridículo el cual brinde confort y utilidad.
- Existe efectividad en el diseño del sistema de racha, el cual en el prototipo funciono tal y como se esperaba (*Anexo C*).
- El control de carga y descarga de la batería funciona dentro de los parámetros propuestos y deseados ya que mediante pruebas fuera de esta parte del dispositivo llega a cumplir con el objetivo
- Se logró la generación de energía limpia con métodos mecánicos y aprovechando la marcha del hombre.

En general podríamos decir que a bajas condiciones del sistema por inconvenientes fuera del diseño propuesto se logró el objetivo de generar energía a través de la marcha humana, con dispositivos mecánicos y que no sean extremadamente ridículos para generar una molestia bullying o falta de confort.

Con un excelente maquinado de los elementos principales se estima que la generación mínima de energía estará bordeando los 5 voltios que permitite en gran medida cargar una batería de litio sin problema.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES.

En base al estudio cinemático y cinético de cada articulación usada por el hombre en la marcha se afirma que la articulación de rodilla es la óptima para obtener energía, ya que en la fase de flexo – extensión brinda un ángulo de generación de 60° los mismos que no generan un aumento energético al caminar, además de esto la rodilla no depende de ninguna otra articulación para tener un ángulo de cosecha, como el hombro y el codo, la rodilla brinda un espacio para colocar cualquier artefacto mecánico o electrónico siempre y cuando no se genere molestia al hombre ni se exceda en los tamaños y pesos de los dispositivos, cabe señalar que el tobillo y el pie son miembros que permiten cosechar energía pero por ubicación y el tamaño de los mismos no es aconsejable.

Mediante el análisis de los distintos dispositivos investigados a nivel mundial se considera que todos apuntan a la generación de energía mediante la acción del hombre o aprovechando el desecho de energía en la caminata cabe señalar que cada sistema analizado tiene buenos resultados, la presente investigación con la presente investigación se ha llegado a un diseño capaz de brindar soporte energético a elementos electrónicos como cualquier otro artefacto de estudio mundial.

Considerando los análisis aplicados a los engranajes, como Von Mises, el esfuerzo máximo de soporte, el factor de seguridad lleva a afirmar que la estructura diseñada es buena para los propósitos de generación de energía, pero la falta de equipo de mecanizado y micro-fresado no permitió obtener resultados más concluyentes del desenvolvimiento del sistema, cabe señalar que los análisis matemáticos y mediante softwares corroboran los pocos resultados obtenidos con el prototipo (*Anexo C*).

El sistema prototipado y la obtención del modelo matemático se puede decir que el dispositivo es altamente eficiente ya que en las pocas pruebas

generará voltajes de 1.2 voltios y al simular el modelo matemático desde 1.2 a 1.7 voltios pudiendo definirlo como altamente eficiente considerando que en una caminata normal la producción va a ser más alta por el tiempo de marchado y la velocidad de la zancada.

En tanto al diseño de cubiertas y sujeciones se podría decir que cumplen con su función en especial las cubiertas ya que mantienen el dispositivo protegido de los cambios climáticos, lastimosamente las sujeciones no pudieron ser fabricadas por que no había sentido alguno fabricarlas si el dispositivo no podía ser probado, pero por los resultados del prototipo acoplado a una rodillera el diseño propuesto da brindara una mejor sujeción y comodidad con respecto a la rodillera.

En conjunto el generador lleva a ampliar la aplicabilidad puesto que se diseñó con el objetivo de energizar prótesis en personas amputadas, pero también puede usarse para la recarga de dispositivos electrónicos como smartphones, mp3, entre otros.

Los resultados y el modelo matemático del sistema permitirán avanzar con la investigación de este diseño en trabajos posteriores, en donde se pretende que la energía renovable sea la primordial en el país desechando así las energías convencionales.

RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Analizar el cambio de sistemas mecánicos por sistemas electrónicos o magnéticos los cuales mejoren el diseño y puedan ser desarrollados con la tecnología y el talento humano de nuestro entorno.

Se recomienda probar relaciones de transmisión entre piñón y corona en los distintos eslabones del tren con engranajes normalizados para tratar de compensar los engranes de diseño.

Se recomienda llevar a cabo pruebas de nuevos materiales de menor peso y mayor resistencia que garantice la utilización del dispositivo en distintos ambientes y en varios escenarios.

Profundizar en el análisis estructural de la sujeción del dispositivo tomando en cuenta la musculatura de las personas de distintas edades y sexo.

Tomar en consideración la vida útil del dispositivo a diferentes ambientes de desarrollo así también los deterioros de los elementos constitutivos, y poder fijar un tiempo de utilización diaria.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Lactato. - Es un compuesto orgánico que se produce naturalmente en el cuerpo de cada persona. es un producto secundario del ejercicio, también es un combustible, se encuentra en los músculos, la sangre y varios órganos como hígado y corazón en menor porcentaje.

Helicoidales. – Relativo a la forma de una hélice

Electrolito. - Es una sustancia que puede someterse a electrolisis (la descomposición en disolución a través de la corriente de electricidad). Los electrolitos contienen iones libres que actúan como conductores eléctricos.

Artrósicas. - Relativo a la artrosis, es una alteración patológica, degenerativa y no inflamatoria de las articulaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Alon Cervera. (marzo de 2016). Biomechanical Energy Harvesting System With Optimal Cost-of-Harvesting Tracking Algorithm. *IEEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN POWER ELECTRONICS*, 4.0, 293-302.
- Articulaciones. (2009). *la Articulación.com*. Obtenido de <http://www.lasarticulaciones.com/articulaciones/hombro/>
- Articulaciones, L. (2009). *lasarticulaciones*. Obtenido de <http://www.lasarticulaciones.com/articulaciones/codo/>
- bateriasdelitio. (27 de 06 de 2014). *baterias de litio. net*. Obtenido de <http://bateriasdelitio.net/?p=161>
- Bertha Catalina Punin Sigcha, Maria Augusta Flores, Fernando Uguiles,. (s.f.). Análisis del torque de la rodilla para implementar un exoesqueleto. *Universidad Politécnica Salesiana*, 6-10. Recuperado el 19 de 06 de 2016
- Cambre, R. (14 de 08 de 2014). *Elotrolado*. Recuperado el 20 de 06 de 2015, de http://www.elotrolado.net/noticia_desarrollan-una-calcomania-que-convierte-el-sudor-en-electricidad_24786
- CEJAROSU. (2005). *cnice*. Recuperado el 29 de 06 de 2015, de http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/mecanismos/mec_eng_tren.htm
- Serveró, S. (s.f.). Biomecánica de la rodilla.
- Csiro. (29 de 10 de 2007). *Muy interesante*. Recuperado el 20 de 06 de 2015, de <http://www.muyinteresante.es/tecnologia/articulo/ropa-generadora-de-energia>
- Diego, R. d. (2010). Obtenido de polamalu: <http://polamalu.50webs.com/OF1/mecanica/engranajes.htm#Fórmulas>
- Dihigo, M. E. (2001). *Anatomía Fisiología e Higiene*. Habana: Impresores Habana. Recuperado el 18 de 03 de 2015
- Ecologistas. (06 de 2007). *Ecologistas en acción*. Recuperado el 10 de 07 de 2015, de <http://www.ecologistasenaccion.org/article10057.html>
- Educa, E. (2014). *Endesa*. Recuperado el 18 de 06 de 2015, de http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/v.-funcionamiento-basico-de-generadores
- Enel, G. (2014). *Endesa*. Recuperado el 09 de 02 de 2017, de http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/v.-funcionamiento-basico-de-generadores
- Estefani, G. (04 de 2013). *Artinaid*. Recuperado el 10 de 06 de 2015, de <http://www.artinaid.com/2013/04/que-es-un-generador-electrico/>
- Física, T. (2007). *Terapia Física*. Recuperado el 29 de 04 de 2015, de <http://www.terapia-fisica.com/marcha.html>

- García, A. (06 de 04 de 2014). Obtenido de <http://comocrearunapila.blogspot.com/>
- García, E. J. (2013). Clínica y exploración del hombro. *CIR ORTOPÉDICA Y TRAUMATOLOGÍA*, 11.
- García, E. J. (2013). El codo. *Cir. Ortopédica y Traumatología*, 2. Obtenido de http://www.traumazaragoza.com/traumazaragoza.com/Documentacion_files/Balance%20articular%20del%20codo.pdf
- García, E. J. (2013). Los dedos de la mano. *Cir ortopedia y traumatología*, 2. Obtenido de <http://www.traumazaragoza.com/traumazaragoza.com/Documentacion.html>
- Hayashida, J. (2000). Unobtrusive Integration of Magnetic Generator Systems into. *Infomed red de salud Cuba*. (s.f.). Recuperado el 08 de 06 de 2015, de http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-bio/usd_rodilla._texto.pdf
- Ingemecánica. (2013). *ingemecanica*. Obtenido de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html#seccion2>
- J. Maxwell , Veronica Naing, Qingguo Li. (2009). Biomechanical Energy Harvesting. *IEEE*. Recuperado el 02 de 06 de 2015
- Javier Guacaneme , Danny González , César Trujillo . (2003). Controlador difuso inteligente para un cargador de baterías de plomo-ácido. *08*, 62-67. Obtenido de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/2693/3879>
- Jorge, U. S. (13 de 03 de 2016). *Funny Biomechanics*. Recuperado el 09 de 02 de 2017, de http://usjfunnybiomechanics.blogspot.com/2016_03_01_archive.html
- Joseph Shigley . (2014). *Diseño en Ingeniería Mecánica*. McGraw-Hill. Recuperado el 10 de 06 de 2015
- Knudson, D. (2007). *Funamentals of Biomechanics* (segunda ed.). California USA: Springer. Recuperado el 02 de 06 de 2015
- López, M. (21 de 03 de 2012). *Vitónica alimentación, deporte y salud*. Recuperado el 28 de 04 de 2015, de <http://www.vitonica.com/anatomia/todo-sobre-la-rodilla-iv-que-son-los-meniscos>
- M.A Gómez , H.G. Alvarado R. (2010). Marcha en la Rodilla por medio de la Tecnología ZigBee. *Revista Colombiana de Física*, 42. Recuperado el 28 de 04 de 2015
- Mabuchi. (s.f.). *RF- 310TA - 11400*. Recuperado el 15 de 02 de 2015, de <http://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/238465.PDF>
- Marina, R. (22 de 11 de 2014). *EFFUTURO*. Recuperado el 18 de 06 de 2015, de <http://www.efefuturo.com/noticia/el-soldado-generator-de-energia/>
- Michael Shepertycky, Jun-Tian Zhang, Yan-Fei Liu, and Qingguo Li. (2013). Development of an Energy Harvestin Backpack. *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, 6.
- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de Máquinas*. Mexico: PEARSON. Recuperado el 23 de 06 de 2015

- Nordin, M. (2004). *Biomecánica Básica del sistema musculoesquelético*. Madrid: McGraw - Hill. Recuperado el 28 de 04 de 2015
- Norton, R. L. (2009). *Diseño de Maquinaria*. Mexico: Mc Graw Hill. Recuperado el 05 de 05 de 2015
- Pizarro, V. (08 de 08 de 2014). *veoverde*. Obtenido de <https://www.veoverde.com/2014/08/moda-ecologica-gracias-a-fibras-de-tela-fotovoltaicas/>
- Pulido, L. (2012). *Lecciones elementales de electricidad*. Buenos Aires: HOBBY. Recuperado el 10 de 05 de 2015
- Ramirez, T. G. (13 de 12 de 2013). *Patologías en rodilla*. Recuperado el 28 de 04 de 2015, de <http://patologiasenrodilla.blogspot.com/2013/12/componentes-del-mmii.html>
- Sanmetal. (s.f.). *Sanmetal s,a*. Recuperado el 23 de 06 de 2015, de <http://www.sanmetal.es/productos/termoplasticos/nylon-poliamida-6/9#caracteristicas-principales>
- Shigley, J. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica* (Octava Edición ed.). Mc Graw Hill.
- Simpson, Chester, Texas Instruments. (s.f.). *Battery Charging*. Recuperado el 20 de 06 de 2015
- Solsona, D. S. (2006). Nopainrun. Recuperado el 28 de Diciembre de 2015, de Biomecánica de la rodilla: <http://www.nopainrun.com/biomecanica-rodilla.html>
- Soon Mok Haa, Il Seok Parkb, Michael Wisslerc, Ron Pelrined, Scott Stanfordd, Kwang J. Kimb,, (2008). High Electromechanical Performance of Electroelastomers Based on Interpenetrating Polymer Networks.
- SportLife. (01 de 8 de 2010). *SportLife Extensores de rodilla*. Recuperado el 28 de 04 de 2015, de <http://www.sportlife.es/salud/mecano-humano/articulo/extensiones-rodilla>
- Tapia, A. (29 de 12 de 2014). *Constructor eléctrico*. Obtenido de <http://constructorelectrico.com/energia-que-emerge-al-paso/>.
- Tareasfacil. (2013). *tareasfacil*. Recuperado el 28 de 06 de 2015, de <http://www.tareasfacil.info/categorias/Autos/Mantenimiento/partes-de-la-bateria.html#axzz3eYLfTdfw>
- TECHNOLOGIES, U. U. (s.f.). *UTC UNISONIC TECHNOLOGIES CO. LTD*. Recuperado el 20 de 06 de 2015
- U. Lanza, C.Müller-Karger, C. Graciano. (2006). Análisis por elementos finitos de adaptadores modulares para prótesis ortopédica transtibial. *Mecánica Computacional*, 2567. Obtenido de <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/651/621>
- ULTRAPLAS. (s.f.). *Acrílico y policarbonato*. Recuperado el 24 de 06 de 2015, de <http://www.acrilico-y-policarbonato.com/acrilico.html>
- Uzcátegui, E. Y. (2008). ALGUNOS EFECTOS DE LA ENERGIA EN EL MEDIO. *Faces*, 6. Obtenido de <http://servicio.bc.uc.edu.ve/faces/revista/a2n5/2-5-1.pdf>
- Vega, C. (2015). *Informe Propiedades Químicas de los elementos*. Recuperado el 06 de 07 de 2015, de 14433921539 115 Practica%252B4%252BCinthya%252BVega.pdf

ANEXOS

ANEXOS A: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE MATERIALES.

Nylon o Poliamida 6

Ficha técnica

Características mecánicas	Método/Prueba (DIN /ASTM)	Valor	Unidad
Densidad	53479	1,14	g/cm ³
Elongación en punto de fluencia	53455	85	MPa
Resistencia al desgarro	53455		MPa
Resistencia a la rotura por alargamiento	53455	70	%
Módulo de elasticidad a la tracción	53457	3200	MPa
Módulo de elasticidad a la flexión	53457		MPa
Dureza Brinell (por penetración de bola)	53456	70/160	MPa
Resistencia al impacto	53453	no.Br.	KJ/m ²
Resistencia a la fluencia tras 1000 h. de carga estática			MPa
Resistencia al alargamiento, por 1%, tras 1000 hrs		5	MPa
Coefficiente de fricción contra acero endurecido y afilado p=0,05 N/mm ² , v=0,6 m/s		0,38-0,45	-
Desgaste por fricción, en las mismas condiciones		0,23	m/km

Fuente: (Shigley J. , 2014)

Características térmicas	Método/Prueba (DIN /ASTM)	Valor	Unidad
Temperatura de fusión	53736	220	
Temperatura de vitrificación dinámica	53736	-40	
Resistencia a la deformación Procedimiento A Procedimiento B	ISO 75 ISO 75	75 190	°C °C
Temperatura de empleo durante poco tiempo		160	°C
Capacidad de conductividad calorífica específica		0,23	W/(m.K)
Capacidad calórica		1,7	J/(g.K)
Coefficiente de dilatación longitudinal		7	10(-5) /K

Características eléctricas	Método/Prueba (DIN /ASTM)	Valor	Unidad
Coefficiente dieléctrico	53483	3,7-7	
Factor de pérdida dieléctrica	53483	0,031-0,03	
Resistencia específica de paso	53482	10(15)	W.cm
Resistencia superficial	53482	10(13)	W
Resistencia de chispa eléctrica	53481	20-50	KV/mm
Resistencia a las corrientes parásitas	53480	KA 3c/3b	

Otros datos	Método/Prueba (DIN /ASTM)	Valor	Unidad
Absorción de humedad en NK hasta alcanzar la saturación	53714	3	%
Absorción de agua hasta alcanzar la saturación	53495	9,5	%
Resistencia al agua caliente, lejía de lavado		Resistencia condicionada	
Inflamabilidad (norma UL 94)	UL 94	HB	
Comportamiento a la intemperie		Inestable	

Fuente: (Sanmetal, s.f.)

HIERRO

APÉNDICE B PROPIEDADES DE DISEÑO PARA EL HIERRO COLADO

Designación del material (número ASTM)	Grado	Resistencia a la tensión		Resistencia de fluencia		Ductilidad (porcentaje de elongación en 2 pulgadas)	Módulo de elasticidad	
		(ksi)	(MPa)	(ksi)	(MPa)		(10 ⁶ psi)	(GPa)
Hierro gris								
A48-84a	30	20	138			<1	12	83
	25	25	172			<1	13	90
	30	30	207			<1	15	103
	40	40	276			<1	17	117
	50	50	345			<1	19	131
	60	60	414			<1	20	138
Hierro maleable								
A47-99	32310	50	345	32	271	10	25	172
	35018	53	365	35	241	18	25	172
A270-99	40010	60	414	40	276	10	26	179
	45006	65	448	45	310	6	26	179
	50005	70	483	50	345	5	26	179
	55003	85	586	70	483	3	26	179
	60001	105	724	90	621	1	26	179
	Hierro dúctil							
A536-84	60-40-18	60	414	40	276	18	22	152
	80-55-06	80	552	55	379	6	22	152
	100-70-03	100	689	70	483	3	22	152
	120-90-02	120	827	90	621	2	22	152
Hierro dúctil templado desde austemperado								
ASTM A57-90	1	125	850	80	550	10	22	152
	2	150	1050	100	700	7	22	152
	3	175	1200	125	850	4	22	152
	4	200	1400	155	1100	1	22	152
	5	230	1600	185	1300	<1	22	152

Nota: Los valores de resistencia son típicos. Las variaciones del estado y el tamaño de la sección afectan los valores típicos. También puede variar el módulo de elasticidad. La densidad de los hierros colados va de 0.25 a 0.27 lb/pulg³ (3930 a 7400 kg/m³). La resistencia de compresión es de 3 a 2 veces mayor que la resistencia a la tensión.

Fuente: (Mott, 2006)

ACRÍLICO

El peso de la lámina de acrílico corresponde al 50% del peso del vidrio y al 43% del peso del aluminio.

Peso en libras por pie cuadrado	espesor en pulgadas
0.74	0.118
1.10	0.177
1.48	0.236

Resistencia al Impacto de Lámina de PMMA comparada con la de Vidrio de diferentes tipos

Material	Espesor en mm	Peso de Bola de Acero en caída libre en kg	Energía necesaria para romper el material en libras-pies
Lámina de Acrílico	2.5	0.11	3.0
	3.0	.91	4.7
	4.5	.91	11.1
	6.0	2.27	18.1
Cristal de Ventana	2.5	.11	0.8
Cristal Doble Resistencia	3.2		1.8
Cristal Flotado	4.8		2.0
	6.4		1.0
Vidrio de Seguridad Laminado	6.4	.11	1.1
Rough Wire Glass, impacto sobre lado áspero			2.2
Rough Wire Glass, impacto sobre lado liso			0.2
Wireglass pulido			0.4

Propiedades	Método ASTM	Unidades	Tipo de Lámina	
			Estándar	Alto Impacto
Espesor		pulgadas	0.236	0.236
Gravedad Específica	D792	no aplicable	1.19	1.19
Índice Refractivo	D542	no aplicable	1.49	1.49
Transmisión de Luz y "Haze" <ul style="list-style-type: none"> • paralelo • total • "Haze" 	D1003	% % %	91 92 1	91 92 2
Después de 5 años de exposición a la intemperie, ángulo de 45°, mirando hacia el sur <ul style="list-style-type: none"> • paralelo • total • "Haze" 		% % %	90 92 2	90 92 5
Después de 240 horas de exposición a luz artificial <ul style="list-style-type: none"> • paralelo • "haze" 		% %	90 2	- -
Artificial Weathering	D1501		nada nada	nada nada
Cambios en el Índice de Amarillez, medido instrumentalmente	D1925	no aplicable	1.0	0.8
Transmisión Ultravioleta, 320nm	Beckman DU-792	%	0	0

Fuente: (ULTRAPLAS, s.f.)

ALEACIONES DE ALUMINIO FUNDIDAS

PROPIEDADES MECÁNICAS DE ALEACIONES DE ALUMINIO FUNDIDAS

Propiedades típicas para tamaños de 1/4-pulg. Estos valores no son el medio ni el mínimo, sino los que se pueden obtener con un cuidado razonable. La resistencia a la fatiga es para $50(10)^7$ ciclos de esfuerzo alterante. Las dos resistencias de fluencia se obtienen por el método del 0.2% de desplazamiento. Para obtener su equivalente en MPa se multiplican 6.89 las cantidades en kpsi.

Número UNS y revenido	Tensión			Resistencia de fluencia a la compresión kpsi	Módulo de ruptura al cortarse kpsi	Resistencia a la fatiga kpsi	Dureza Brinell H_B
	Resistencia de fluencia kpsi	Resistencia última kpsi	Elongación en 2 pulg %				
A03190*	18	27	2.0	19	22	10	70
A03190-T6*	24	36	2.0	25	29	10	80
A03330†	19	34	2.0	19	27	14.5	90
A03330-T5†	25	34	1.0	25	27	12	100
A03330-T6†	30	42	1.5	30	33	15	105
A03330-T62†	40	45	1.5	40	36	10	105
A03550-T6*	25	35	3.0	26	28	9	80
A03550-T7*	36	38	0.5	38	28	9	85
A03550-T71*	29	35	1.5	30	26	10	75
A03560-T51*	20	25	2.0	21	20	7.5	60
A03560-T6*	24	33	3.5	25	26	8.5	70
A03560-T7*	30	34	2.0	31	24	9	75

* Fundición en arena.

† Fundición en molde permanente.

Fuente: (Mott, 2006)

ACEROS

PROPIEDADES MECÁNICAS DE ACEROS

Los valores indicados para aceros laminados en caliente (HR, *hot-rolled*) y estirados en frío (CD, *cold-drawn*) son *valores mínimos estimados* que suelen esperarse en el intervalo de tamaños de $\frac{1}{2}$ a $1\frac{1}{2}$ pulg. Un valor mínimo está aproximadamente varias desviaciones estándares por debajo de la media aritmética. Los valores mostrados para aceros con tratamiento térmico son los llamados *valores típicos*. Un valor típico no es el medio ni el mínimo. Puede obtenerse mediante un control cuidadoso de las especificaciones de compra y el tratamiento térmico, junto con la inspección y ensayo continuos. Las propiedades indicadas en esta tabla provienen de varias fuentes y se cree que son representativas. Sin embargo, hay tantas variables que afectan estas propiedades que su naturaleza aproximada debe reconocerse claramente.

Número UNS	Número AISI	Procesamiento	Resistencia de fluencia ksi †	Resistencia a la tensión ksi †	Elongación en 2 pulg %	Reducción en área %	Dureza Brinell H _B
G10100	1010	HR	26	47	28	50	95
		CD	44	53	20	40	103
G10150	1015	HR	27	50	28	50	101
		CD	47	56	18	40	111
G10180	1018	HR	32	58	25	50	116
		CD	54	64	15	40	126
	1112	HR	33	56	25	45	121
		CD	60	78	10	35	167
G10350	1035	HR	39	72	18	40	143
		CD	67	80	12	35	163
		Estirado a 800°F	81	110	18	51	220
		Estirado a 1000°F	72	103	23	59	201
		Estirado a 1200°F	62	91	27	66	180
G10400	1040	HR	42	76	18	40	149
		CD	71	85	12	35	170
		Estirado a 1000°F	86	113	23	62	235
G10450	1045	HR	43	82	16	40	163
		CD	77	91	12	35	179
G10500	1050	HR	49	90	15	35	179
		CD	84	100	10	30	197
		Estirado a 500°F	180	220	10	30	450
		Estirado a 900°F	130	155	18	55	310
		Estirado a 1200°F	80	105	28	65	210
	2317	Núcleo :	107	137	22	52	285
	2330	Estirado a 400°F	195	221	11	40	425
		Estirado a 600°F	171	196	14	49	382
		Estirado a 800°F	131	160	18	56	327
		Estirado a 1000°F	97	127	23	61	268
		Estirado a 1200°F	70	108	27	64	222
	2340	Estirado a 800°F	164	178	23	53	368
	2345	Estirado a 800°F	177	188	20	51	388
	2350	Estirado a 800°F	180	194	17	50	402
	3120	Estirado a 600°F	145	162	12	45	320
		Estirado a 1000°F	91	112	22	68	222
	3130	Estirado a 600°F	178	210	10	37	404
		Estirado a 1000°F	120	137	20	62	276
	3140	HR§	64	96	26	56	197
		CD	91	104	17	48	212
		Estirado a 800°F	157	188	15	50	376
	3145	Estirado a 800°F	164	195	12	47	380
	3150	Estirado a 800°F	171	202	12	44	396
	3240	Estirado a 600°F	211	237	10	40	466
	3250	Estirado a 600°F	214	243	9	37	477
	3340	Estirado a 800°F	183	211	13	47	394
G41300	4130	HR§	60	90	30	45	183
		CD§	87	98	21	52	201
		Estirado a 1000°F	133	146	17	60	293
G41400	4140	HR§	63	90	27	58	187
		CD§	90	102	18	50	223
		Estirado a 1000°F	131	153	16	45	302
G43400	4340	HR§	69	101	21	45	207
		CD§	99	111	16	42	223
		Estirado a 600°F	234	260	12	43	498
		Estirado a 1000°F	162	182	15	40	363
G46200	4620	Núcleo :	89	120	22	55	248
		Estirado a 800°F	94	130	23	66	256
	4640	Estirado a 800°F	170	187	13	54	378
	4650	Estirado a 800°F	179	198	13	49	410
G15215	52100	HR§	81	100	25	57	192
G61500	6150	HR§	58	91	22	53	183
		Estirado a 1000°F	132	155	15	44	302
	8650	HR§	58	99	20	48	197
		Estirado a 1000°F	132	155	14	42	311
G87400	8740	HR§	64	95	25	55	190
		CD§	96	107	17	48	223
		Estirado a 1000°F	129	152	15	44	302
G92550	9255	HR§	78	115	22	45	223
		Estirado a 1000°F	160	180	15	32	352
	9442	Estirado a 800°F	180	201	12	43	404
	9840	Estirado a 800°F	199	218	12	47	436

FACTOR DE LEWIS PARA ANGULO DE PRESIÓN DE 20 GRADOS

Número de dientes	Y	Número de dientes	Y
12	0.245	28	0.353
13	0.261	30	0.359
14	0.277	34	0.371
15	0.290	38	0.384
16	0.296	43	0.397
17	0.303	50	0.409
18	0.309	60	0.422
19	0.314	75	0.435
20	0.322	100	0.447
21	0.328	150	0.460
22	0.331	300	0.472
24	0.337	400	0.480
26	0.346	Cremallera	0.485

Fuente: (Shigley J. , 2008)

FACTOR DE SOBRECARGA K_o

Máquina impulsada			
Fuente de potencia	Uniforme	Impacto moderado	Impacto pesado
Uniforme	1.00	1.25	1.75
Impacto ligero	1.25	1.50	2.00
Impacto medio	1.50	1.75	2.25

Fuente: (Shigley J. , 2008)

FACTOR GEOMÉTRICO J

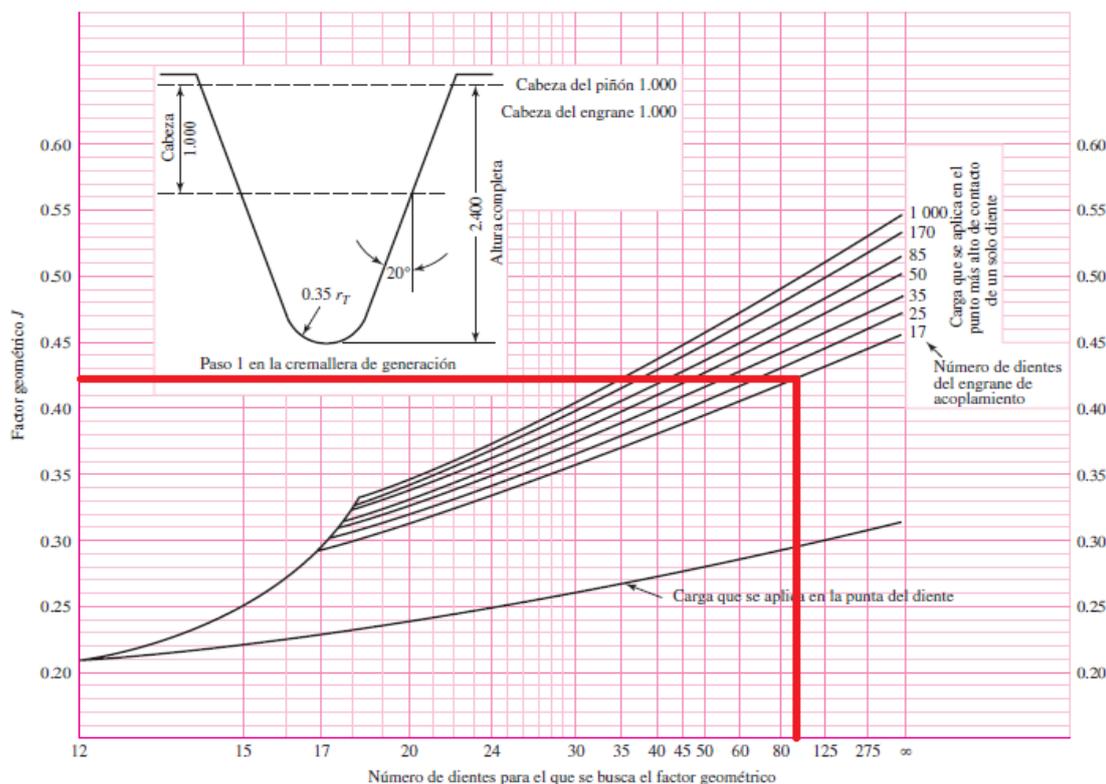


Figura 14-6

Factores geométricos J de engranes rectos. Fuente: La gráfica es de AGMA 218.01, lo que es consistente con los datos tabulares provenientes del actual AGMA 908-B89. La gráfica es adecuada para propósitos de diseño.

Fuente: (Shigley J. , 2008)

FACTOR DE DISTRIBUCIÓN DE CARGA, K_m

CONDICIÓN DE SOPORTE	ANCHO DE LA CARA, pulgadas (mm.)			
	≤ 2 (50)	6 (150)	9 (225)	≥ 16 (400)
Montaje exacto, con bajas holguras en cojinetes, deflexiones mínimas. Engranajes de precisión.	1,30	1,40	1,50	1,80
Montajes menos rígidos, engranajes menos precisos, con contacto a todo lo ancho de la cara.	1,60	1,70	1,80	2,00
Exactitud y montaje de modo que exista contacto incompleto con la cara	> 2,00			

Tabla 4. Factor de distribución de la carga (K_m)

Fuente: (Ingemecánica, 2013)

FACTOR DE DUREZA, CH

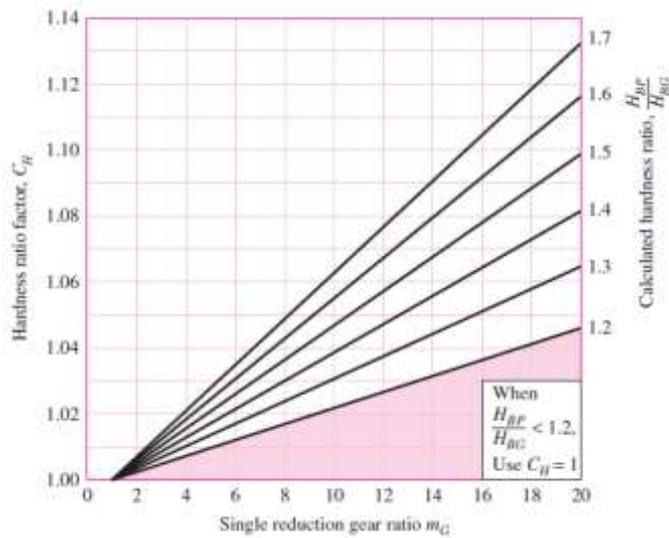


Figura 14-14

Factor de ciclos de esfuerzo repetidamente aplicados de resistencia a la flexión Y_N .
(Fuente: ANSI/AGMA 2001-D04.)

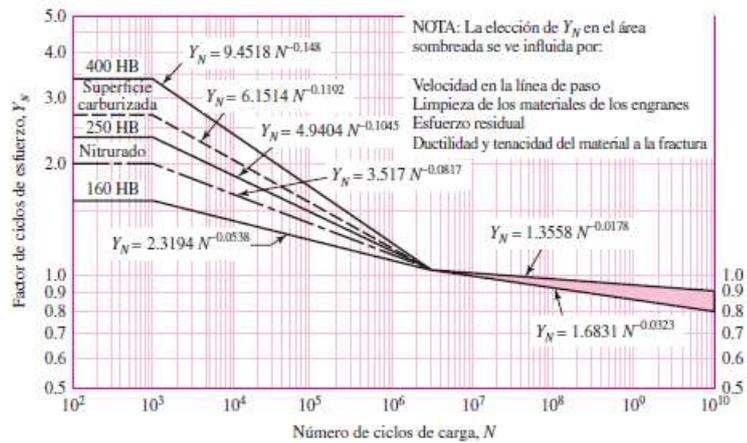
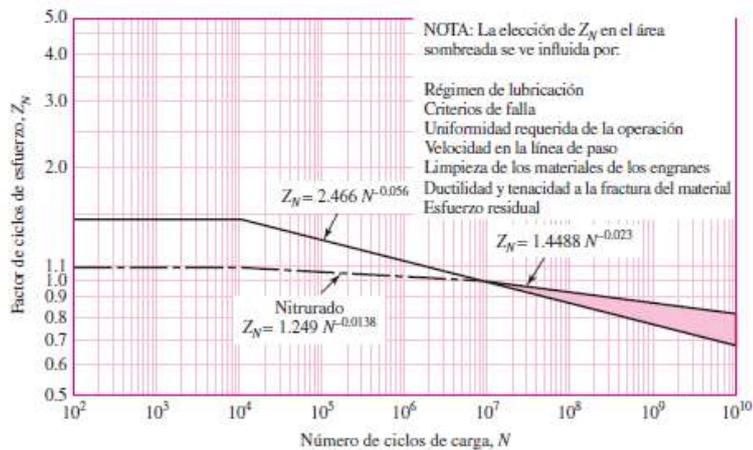


Figura 14-15

Factor de ciclos de esfuerzos de resistencia a la picadura Z_N . (Fuente: ANSI/AGMA 2001-D04.)



Fuente: (Shigley J. , 2008)

ANEXOS B: HOJAS DE DATOS DEL GENERADOR



RF-310TA

MABUCHI MOTOR

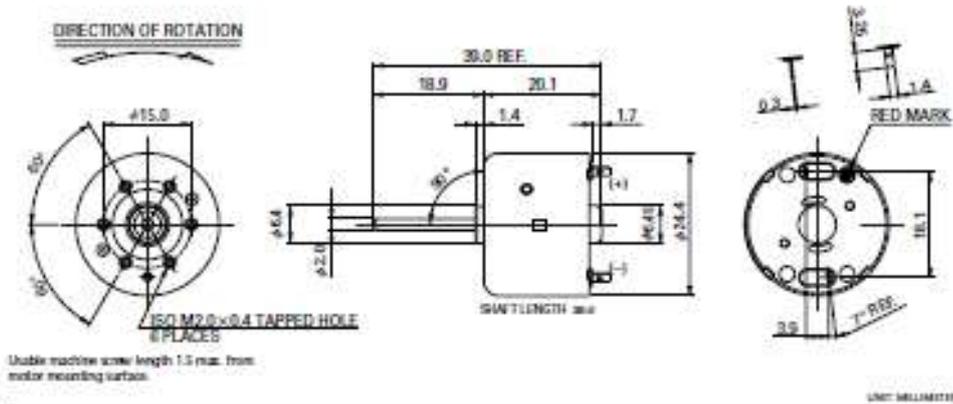
Precious metal-brush motor

OUTPUT : 0.06W - 0.5W (APPROX)

WEIGHT : 29g (APPROX)

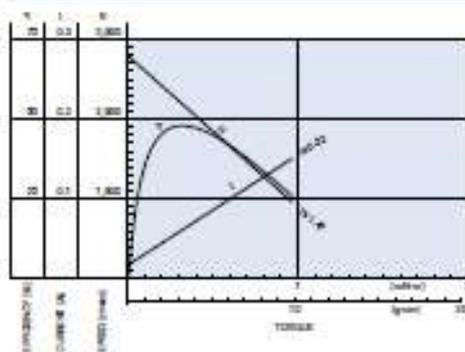
Typical Applications : Audio and Visual Equipment : CD Player / DVD Player

MODEL	VOLTAGE		NO. LOAD		RATED PERFORMANCE					RATED		
	OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED (RPM)	CURRENT (A)	SPEED (RPM)	CURRENT (A)	TORQUE (g-cm)	Q/100	Q/100	TORQUE (g-cm)	CURRENT (A)	
RF-310TA-11400	1-6	2.5V CONSTANT	2800	0.017	2190	0.061	0.22	3.2	0.073	1.47	15	0.22



RF-310TA-11400

2.5V



Copyright © 2004 Mabuchi Motor Co., Ltd. All rights reserved. Printed in Japan. RF-310TA-11400 (2004.08)

ANEXOS C: PROTOTIPO



PLANOS DEL DISEÑO MECÁNICO