



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE UN EXOSQUELETO ROBÓTICO
PARA DISCAPACITADOS DE UN MIEMBRO INFERIOR**

Edson Didier López Cardona

Asesorado por la Inga. Ingrid Rodríguez de Loukota

Guatemala, septiembre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN EXOSQUELETO ROBÓTICO
PARA DISCAPACITADOS DE UN MIEMBRO INFERIOR**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

EDSON DIDIER LÓPEZ CARDONA

ASESORADO POR LA INGA. INGRID RODRÍGUEZ DE LOUKOTA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN EXOESQUELETO ROBÓTICO PARA DISCAPACITADOS DE UN MIEMBRO INFERIOR

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha abril de 2010.



Edson Didier López Cardona

Guatemala 28 de marzo de 2014

Ingeniero
Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador del Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Estimado Ingeniero Guzmán.

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN EXOESQUELETO ROBÓTICO PARA DISCAPACITADOS DE UN MIEMBRO INFERIOR**, del señor **Edson Didier López Cardona**, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo, como su asesora, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,



Inga. Ingrid Rodríguez de Loukota
Colegiada 5,356
Asesora

Ingrid Rodríguez de Loukota
Ingeniera en Electrónica
colegiado 5356



Ref. EIME 17. 2014
Guatemala, 7 de ABRIL 2014.

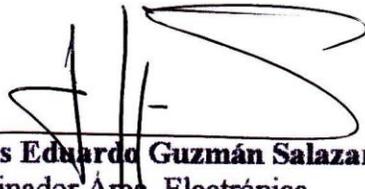
Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
DISEÑO DE UN EXOESQUELETO ROBÓTICO PARA
DISCAPACITADOS DE UN MIEMBRO INFERIOR, del
estudiante Edson Didier López Cardona, que cumple con los requisitos
establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador Área Electrónica



STO



REF. EIME 17. 2014.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; EDSON DIDIER LÓPEZ CARDONA titulado: DISEÑO DE UN EXOESQUELETO ROBÓTICO PARA DISCAPACITADOS DE UN MIEMBRO INFERIOR, procede a la autorización del mismo.


Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

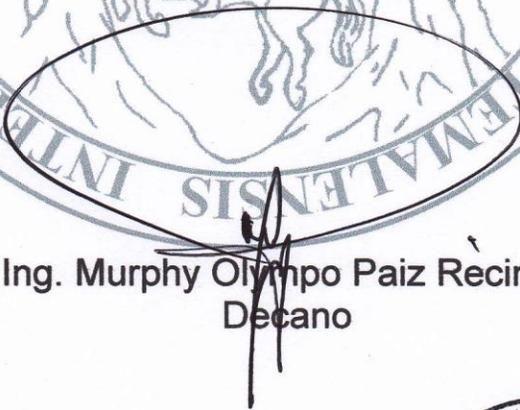


GUATEMALA, 7 DE MAYO 2,014.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN EXOESQUELETO ROBÓTICO PARA DISCAPACITADOS DE UN MIEMBRO INFERIOR**, presentado por el estudiante universitario: **Edson Didier López Cardona** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, septiembre de 2014



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la dicha y la bendición de alcanzar este sueño tan importante para mí.
Mis padres	Olivia Cardona y Felipe López, por brindarme su apoyo incondicional para alcanzar este logro.
Mis hermanos	Henry y Meissner López Cardona, por ayudarme y apoyarme cuando lo necesitaba.
Mis abuelos	Victoriano Cardona y Eulalia Ramírez (q.e.p.d.)
Mis familiares	Por acompañarme y ser parte de este evento especial.
Mis amigos y amigas	Por sus buenos deseos y por estar presente en este día especial.
A las personas discapacitadas	Por su lucha día a día ante las adversidades, para vivir en paz y armonía.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por su amor, sabiduría, paciencia, y muchos regalos y bendiciones que me ha dado al lado de mi familia y amigos.
La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de pertenecer, convivir y formar parte de esta casa de estudios en sus 337 años de existencia.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme una excelente formación profesional en el área de la ingeniería.
Mis profesores y profesoras	Por enseñarme y compartir sus conocimientos, experiencias y consejos para mi formación profesional.
Mis padres	Por darme su apoyo moral e incondicionalmente para lograr este proyecto de vida.
Mis amigos y amigas de la Facultad	Por brindarme su amistad, compañerismo y apoyo en los diferentes cursos y proyectos que realizamos a lo largo de la carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
INTRODUCCIÓN.....	XXVII
1. ANTECEDENTES Y FUNDAMENTOS SOBRE ROBÓTICA, ANATOMÍA HUMANA Y LA ELECTRÓNICA EN LA MEDICINA	1
1.1. Antecedentes históricos.....	1
1.2. Definición y clasificación de un robot.....	4
1.2.1. Tipos de robots	5
1.2.1.1. El robot androide	5
1.2.1.2. El robot móvil	6
1.2.1.3. El robot industrial	6
1.2.1.4. El robot en la medicina	7
1.2.1.5. El robot teleoperado	7
1.3. Anatomía del cuerpo humano.....	7
1.3.1. La pierna humana.....	8
1.3.2. El pie humano.....	9
1.4. Los exoesqueletos y endoesqueletos.....	10
1.4.1. El esqueleto humano	10
1.4.2. El endoesqueleto	11
1.4.3. El exoesqueleto	11
1.4.4. Los exoesqueletos artificiales.....	12

1.5.	La electrónica en el campo de la medicina	15
1.5.1.	Reseña histórica de la electrónica.....	16
1.5.2.	La electrónica en la medicina	17
1.5.3.	La nanotecnología y nanoelectrónica.....	18
1.5.4.	La nanotecnología en la medicina.....	20
2.	TEORÍA DE LA MORFOLOGÍA DE UN ROBOT	23
2.1.	La morfología de un robot	23
2.1.1.	La estructura mecánica de un robot	24
2.1.2.	Las transmisiones de un robot	26
2.1.3.	Los reductores de un robot.....	27
2.1.4.	Los actuadores de un robot.....	28
2.1.4.1.	El actuador neumático.....	28
2.1.4.2.	El actuador hidráulico	29
2.1.4.3.	El actuador eléctrico.....	30
2.1.5.	Los sensores de un robot.....	36
2.1.5.1.	Los sensores internos	36
2.1.5.2.	Los sensores externos	41
2.1.5.2.1.	El sensor detección de alcance.....	41
2.1.5.2.2.	El sensor detección de proximidad.....	43
2.1.5.2.3.	El sensor detección de contacto.....	47
2.1.5.2.4.	Los sensores de detección y torsión	48
2.1.6.	Los efectores.....	50

3.	CINEMÁTICA Y DINÁMICA DE UN ROBOT.....	51
3.1.	Fundamentos sobre localización espacial	51
3.1.1.	Representación de la posición.....	51
3.1.1.1.	El sistema de coordenadas cartesianas	51
3.1.1.2.	Sistema de coordenadas polares y cilíndricas.....	52
3.1.1.3.	El sistema de coordenadas esféricas ..	53
3.1.2.	Representación de la orientación	55
3.1.2.1.	La matriz de rotación	55
3.1.2.2.	Los ángulos de Euler	59
3.1.3.	Coordenadas y matrices de transformación homogénea.....	60
3.1.3.1.	Coordenada de traslación.....	63
3.1.3.2.	Coordenada de rotación	64
3.1.3.3.	Ccoordenada de rotación-traslación	65
3.1.3.4.	Coordenada de traslación-rotación.....	66
3.1.3.5.	Composición de matrices homogéneas.....	67
3.2.	Cinemática de un robot.....	68
3.2.1.	Cinemática directa de un robot.....	69
3.2.2.	Cinemática inversa de un robot	71
3.2.3.	La relaciones diferenciales	71
3.3.	Dinámica de un robot	71
3.3.1.	Modelo dinámico de un estructura mecánica de un robot	72
3.3.1.1.	Ley de Newton.....	72
3.3.1.2.	Ley de Euler.....	73

4.	FUNDAMENTOS SOBRE LA MARCHA HUMANA	75
4.1.	La planimetría del cuerpo humano	75
4.2.	Movimiento de la cadera	76
4.2.1.	Movimiento de flexión.....	76
4.2.2.	Movimiento de extensión.....	77
4.2.3.	Movimiento de abducción.....	78
4.2.4.	Movimiento de aducción.....	79
4.3.	Movimiento de la rodilla.....	80
4.3.1.	Movimiento de flexión - extensión	80
4.4.	Movimiento del tobillo.....	81
4.4.1.	Movimiento de flexión - extensión	82
4.5.	La biomecánica de la marcha humana.....	82
4.5.1.	Ciclo de la marcha.....	83
4.5.1.1.	Fase de apoyo.....	83
4.5.1.2.	Fase de balanceo.....	84
4.5.2.	Los intervalos de la marcha humana en el plano sagital	85
4.5.2.1.	Primer intervalo	85
4.5.2.2.	Segundo intervalo	89
4.5.2.3.	Tercer intervalo	92
4.5.3.	El centro de gravedad	94
4.5.4.	La cinética de la marcha.....	94
4.5.4.1.	La fuerza de gravedad	94
4.5.4.2.	La fuerza de reacción.....	95
4.5.4.3.	La fuerza de fricción	95
5.	DISEÑO DEL EXOESQUELETO ROBÓTICO PARA DISCAPACITADOS DE UN MIEMBRO INFERIOR	97
5.1.	El diseño del prototipo exoesquelético	98

5.1.1.	Consideraciones del diseño.....	99
5.1.2.	Mecánica del prototipo exoesquelético.....	100
5.1.2.1.	Encaje del prototipo.....	100
5.1.2.2.	Eslabones del prototipo.....	100
5.1.2.3.	Articulaciones del prototipo.....	101
5.1.3.	Electrónica del prototipo exoesquelético.....	103
5.1.3.1.	Unidad central de procesamiento (UCP).....	103
5.1.3.2.	Sensores del prototipo.....	107
5.1.3.2.1.	Los sensores de la cadera.....	107
5.1.3.2.2.	Los sensores de la rodilla.....	109
5.1.3.3.	Actuadores del prototipo.....	111
5.1.3.4.	Comunicación entre dispositivos.....	112
5.1.3.5.	Fuente de alimentación.....	114
5.2.	Sistema de control.....	115
5.2.1.	Variable de estado o posición.....	116
5.2.2.	Velocidad angular.....	117
5.2.3.	Fuerza de acción y reacción.....	119
5.3.	El análisis de la cinemática del prototipo exoesquelético.....	121
	CONCLUSIONES.....	127
	RECOMENDACIONES.....	129
	BIBLIOGRAFIA.....	131

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Topografía y morfología del cuerpo humano.....	8
2.	La pierna humana y sus componentes.....	9
3.	Morfología del pie humano.....	10
4.	La costillas del ser humano.....	11
5.	El exoesqueleto de un insecto artrópodo.....	12
6.	Exoesqueleto para rehabilitación de personas con discapacidad inmóvil.....	13
7.	Exoesqueleto para sustituir extremidades del cuerpo humano.....	14
8.	Exoesqueleto para proporcionar fuerza al ser humano.....	14
9.	Exoesqueleto para trabajos especiales.....	15
10.	Evolución del campo de la electrónica.....	17
11.	Miniaturización de la electrónica mediante la técnica de <i>Top - Down</i> ..	19
12.	Lámina metálica de dióxido de silicio para hacer crecer polímeros orgánicos usando la técnica de nanotecnología <i>Bottom - Up</i>	20
13.	Nanopartículas transportando fármacos.....	21
14.	Analogía de un robot industrial y el brazo de un ser humano.....	23
15.	Tipos diferentes de articulaciones.....	24
16.	Configuraciones frecuentes de los robots industriales.....	25
17.	Reductor de tipo CYCLO.....	27
18.	Partes de un motor de corriente continua (DC).....	31
19.	Diagrama eléctrico de un motor DC y su función de transferencia.....	32
20.	Diagrama físico y eléctrico de un motor paso a paso (Pap).....	33
21.	El motor de corriente alterna (AC).....	34

22.	Diagrama físico y eléctrico de un potenciómetro	37
23.	Diagrama físico de un <i>encoder</i>	38
24.	Esquema del funcionamiento de un <i>encoder</i>	39
25.	Esquema de un <i>resolver</i>	40
26.	Método de triangulación para la detección de un objeto	42
27.	Funcionamiento de un sensor inductivo	43
28.	Diagrama del funcionamiento del efecto Hall	44
29.	Diagrama del funcionamiento de un sensor capacitivo	45
30.	Diagramas del funcionamiento de un sensor ultrasónico	46
31.	Diagrama de un sensor óptico marca OMRON	47
32.	Diagrama de un sensor de fuerza y torsión con galgas de deformación y un brazo con este sensor	49
33.	Efecto de un brazo robótico	50
34.	Representación de ejes coordenados para dos y tres dimensiones	52
35.	Representación de coordenadas polares y cilíndricas	53
36.	Representación de coordenadas esféricas	54
37.	Representación de la orientación de un sistema OUV respecto de otro sistema OXY en un plano	56
38.	Representación de la orientación de un sistema OUVW respecto de otro OXYZ, en un plano tridimensional	57
39.	Representación de la orientación de un sistema OUVW respecto de otro OXYZ, en un plano tridimensional	60
40.	Esquema de un robot de tres grados de libertad	70
41.	Ilustración de la planimetría del cuerpo humano	75
42.	Ilustración del movimiento de flexión de la cadera	77
43.	Ilustración del movimiento de extensión de la cadera	78
44.	Ilustración del movimiento de abducción de la cadera	79
45.	Ilustración del movimiento de aducción de la cadera	79
46.	Ilustración del movimiento de flexión – extensión de la rodilla	81

47.	Ilustración del movimiento de flexión – extensión del tobillo	82
48.	Ilustración de las fases en la marcha humana	84
49.	Esquema de las fases de la marcha humana	85
50.	Ilustración del movimiento para el tobillo	86
51.	Ilustración del movimiento para la rodilla	87
52.	Ilustración del movimiento para la cadera	88
53.	Ilustración del movimiento para el tobillo	89
54.	Ilustración del movimiento para la rodilla	90
55.	Ilustración del movimiento para la cadera	91
56.	Ilustración del movimiento para la cadera en el tercer intervalo.....	93
57.	Tipos de amputaciones en la pierna de una persona.....	97
58.	Modelado de una pierna humana en una cadena cinemática.....	98
59.	Consideraciones del prototipo exoesquelético.....	99
60.	Diseño mecánico del prototipo exoesquelético.....	102
61.	Esquema de un microcontrolador de la familia PIC 16F877A	104
62.	Diagrama esquemático de la posición del módulo ADC en el microcontrolador PIC 16F877A.....	105
63.	Diagrama esquemático de los registros utilizados en el módulo ADC.....	106
64.	Posición de los sensores en la pierna de la persona.....	108
65.	Movimientos de la rodilla de una persona humana.....	110
66.	Rango de medición y detección del <i>encoder</i> en la rodilla.....	110
67.	Posición del actuador HS - 422 en la rodilla del exoesqueleto.....	112
68.	Batería de LIPO y batería de Li-Ion.....	115
69.	Diagrama del sistema de control para el estado de la pierna humana.....	117
70.	Sistema de control para la velocidad angular.....	118
71.	Sistema de control para la fuerza de reacción.....	121
72.	Análisis del prototipo exoesquelético mediante cinemática inversa...	122

TABLAS

I.	Autómatas famosos	3
II.	Clasificación de robots industriales.....	6
III.	Sistemas frecuentes de transmisión para robots.....	26
IV.	Características importantes en un reductor de un robot.	28
V.	Características de los distintos tipos de actuadores para un robot.....	35
VI.	Tipos de sensores internos en un robot.....	36
VII.	Secuencia de análisis para la cinemática directa.....	69
VIII.	Descripción del movimiento para el tobillo.....	86
IX.	Descripción del movimiento para la rodilla.....	87
X.	Descripción del movimiento para la cadera.	88
XI.	Descripción del movimiento para el tobillo.....	89
XII.	Descripción del movimiento para la rodilla.....	90
XIII.	Descripción del movimiento para la cadera.	91
XIV.	Descripción del movimiento para la tobillo.....	92
XV.	Descripción del movimiento para la rodilla.....	92
XVI.	Descripción del movimiento para la cadera.	93
XVII.	Sistema de control para el estado de la pierna humana.....	116
XVIII.	Sistema de control para la velocidad angular de la rodilla.....	118
XIX.	Sistema de control para la fuerza de reacción.....	120

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
θ_1	Ángulo del primer eslabón con relación a x
θ_2	Ángulo del segundo eslabón con relación al primero
\varnothing	Ángulo desde la proyección de Z hacia el vector p
θ	Ángulo desde una coordenada hacia el vector p
π	Ángulo resultante entre β y θ_2
Δt	Cambio de tiempo
Δv	Cambio de velocidad
Δw	Cambio de velocidad angular
cm^3	Centímetros cúbicos
OX	Coordenada X con respecto al origen
OY	Coordenada Y con respecto al origen
OZ	Coordenada Z con respecto al origen
r	Distancia desde el origen hacia un vector p
$f_{1 \times 3}$	Función nula
Hz	Hertz
I	Inercia
Kg	Kilogramo
KHz	Kilohertz
L_1	Magnitud del primer eslabón
L_2	Magnitud del segundo eslabón
${}^{i-1}A_i$	Matriz de la posición y orientación de i-1 eslabón con respecto al sistema de referencia solidario a la base
$R_{3 \times 3}$	Matriz de rotación de tres filas por tres columnas

R	Matriz de rotación o de cosenos directores
T	Matriz de transformación homogénea
R^T	Matriz ortonormal o transpuesta
W_{1x1}	Matriz unidad
MHz	Megahertz
m²	Metro cuadrado
m/s	Metro por segundo
mg	Miligramo
Nm	Newton – metro
α	Primer ángulo de un triángulo equilátero
z	Proyección sobre el eje OZ
rad	Radián
RA0	Registro analógico 0
β	Segundo ángulo de un triángulo equilátero
OXY	Sistema de referencia fijo
OUV	Sistema móvil al objeto
ΣF	Sumatoria de fuerzas
ΣT	Sumatoria de torques
X_A	Valor inicial en el punto A
X_B	Valor inicial en el punto B
w	Velocidad angular
P_{3x1}	Vector de traslación
p(x, y)	Vector p en coordenadas cartesianas
p(r, θ, z)	Vector p en coordenadas cilíndricas
p(r, θ, ϕ)	Vector p en coordenadas esféricas
p(r, θ)	Vector p en coordenadas polares
i_u	Vector unitario en la coordenada u
j_v	Vector unitario en la coordenada v
k_w	Vector unitario en la coordenada w

\mathbf{i}_x	Vector unitario en la coordenada x
\mathbf{j}_y	Vector unitario en la coordenada y
\mathbf{k}_z	Vector unitario en la coordenada z

GLOSARIO

Abducción	Tipo de movimiento de los miembros inferiores en el plano de simetría hacia afuera del cuerpo.
AC	Tipo de corriente eléctrica que alterna dos polaridades respecto del tiempo.
ADC	Convertidor Analógico Digital.
Aducción	Tipo de movimiento de los miembros inferiores en el plano de simetría hacia adentro del cuerpo.
Articulación	Unión entre dos o más eslabones de un robot.
Artrópodo	Tipo de animal invertebrado de cuerpo con simetría bilateral.
Autómata	Máquina que imita los movimientos de un ser animado.
Automatización	Tecnología que aplica sistemas mecánicos, electrónicos e informáticos para operar y controlar una determinada producción.
Bar	Dimensional que representa a la presión.

Bottom Down	Técnica de la nanotecnología que se basa en realizar procesos, partiendo de lo simple a lo grande.
Bus I2C	Protocolo de comunicación de dispositivos electrónicos mediante dos líneas de transmisión.
Campo magnético	Campo de fuerza originado del movimiento de cargas eléctricas.
Capacitancia	Propiedad eléctrica que tienen los cuerpos para mantener una carga eléctrica.
Chip	Nombre que se le da a los circuitos integrados.
Conductor	Material que tiene propiedades de conducción de la electricidad.
Coseno director	Son los cosenos de los ángulos que forman un vector con relación a otros vectores base.
DC	Tipo de corriente eléctrica rectificadas y constante.
Devanado	Enrollamiento de un alambre a cierto material alrededor de un eje.
Diafesa	Parte media del fémur de un ser humano.
Dieléctrico	Material que no conduce la electricidad y es comúnmente como aislante eléctrico.

Diodo	Dispositivo semiconductor formado por dos tipos de materiales P y N.
Efecto Hall	Campo eléctrico en el interior de un conductor perpendicular al movimiento de las cargas y al campo magnético aplicado.
Electrón	Partícula negativa que gira orbitalmente alrededor de un átomo.
Émbolo	Dispositivo mecánico que está dentro de un cilindro y se desplaza en cierto sentido.
<i>Encoder</i>	Transductor rotativo de tipo incremental y absoluto.
Endoesqueleto	Estructura interna de soporte de un animal.
Estator	Parte fija de una máquina rotativa.
Exoesqueleto	Estructura externa de soporte de un animal.
<i>Feedback</i>	Término que se refiere a la retroalimentación en un sistema de control.
Ferromagnético	Fenómeno físico el cual produce ordenamiento magnético de todas las fuerzas en una muestra.
Fibra óptica	Tecnología de telecomunicaciones que transporta información mediante haces de luz.

Fotodiodo	Dispositivo que se comporta como un diodo cuando le pega la luz.
Fuerza de Lorentz	Fuerza ejercida por el campo electromagnético que recibe una corriente eléctrica.
Galga extensiométrica	Transductor que varía su resistencia eléctrica cuando se contrae o extiende.
GDL	Grado de libertad.
Histéresis	Tendencia de un material a conservar una de sus propiedades en ausencia del estímulo que la ha generado.
I2C	<i>Inter – IC, Integrated circuits</i> , circuitos integrados.
Inductancia	Propiedad eléctrica que almacena energía forma de un campo magnético.
NC	<i>Normally current</i> , normalmente cerrado.
NO	<i>Normally open</i> , normalmente abierto.
LED	<i>Light emisor diode</i> , diodo emisor de luz.
Li - ION	<i>Lithium – ION</i> , iones de litio.
LIPO	<i>Lithium Polymer</i> , polímero de litio.

MEMS	<i>MicroElectroMechanical System</i> , sistema microelectromecánico.
Nano	Prefijo del valor 10^{-9} .
Nanotubos	Estructuras tubulares del diámetro de un nanómetro.
Onda portadora	Onda que transporta información o mensaje.
Ortonormal	Espacio vectorial de un conjunto de vectores igual a la unidad.
Pap	Paso a paso.
Par	Nombre que se le da a una fuerza rotativa.
Piezoeléctrico	Fenómeno que ocurre en ciertos cristales apareciendo una diferencia de potencial eléctrico cuando se somete a tensiones mecánicas.
PLC	<i>Programable Logic Control</i> , control lógico programable.
Potenciómetro	Dispositivo eléctrico que hace variar cierto rango de resistencia mediante una perilla.
Resistencia	Propiedad eléctrica que se opone al paso de flujo de electrones en un conductor.

Resolvers	Sensor captador angular de posición.
Robot	Sistema electromecánico cuyos movimientos son automáticos para operar con cierto propósito.
SCL	<i>Serial clock</i> , reloj serial.
SDA	<i>Serial data</i> , datos seriales.
Semiconductor	Elemento que se comporta como un conductor o aislante, dependiendo de cierta excitación eléctrica.
Sensor	Dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas.
Set point	Instrumentación a un valor como referencia, respecto de otros.
Silicio	Elemento químico metaloide cuyo símbolo es Si que pertenece a la familia de los carbonoideos.
Sistema de lazo cerrado	Sistema de control con retroalimentación.
Sistema de control	Conjunto de dispositivos eléctricos, mecánicos y neumáticos, cuya finalidad es controlar el funcionamiento de un proceso.

Taco generatriz	Es el que proporciona una tensión proporcional a la velocidad de gira de un motor eléctrico.
Tensión	En electricidad se le denomina a una diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.
Titanio	Elemento químico de símbolo Ti y físicamente es un metal de color gris plata bien liviano.
<i>Top Down</i>	Técnica de la nanotecnología que se basa en realizar procesos, partiendo de lo grande a lo simple.
Transductor	Dispositivo que transforma la energía mecánica en eléctrica y viceversa.
Transistor	Dispositivo semiconductor que está formado por materiales tipo PNP o NPN.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se da a conocer el diseño de un exoesqueleto robótico, como una solución para el uso en personas con amputación de algún miembro inferior por causas de accidente o patologías por alguna enfermedad que les dificulta la movilidad mediante la marcha humana.

En el primer capítulo se dan a conocer los antecedentes históricos de la robótica, clasificación y los tipos de robots. También se mencionan los conceptos fundamentales sobre la anatomía humana, los exoesqueletos y endoesqueletos. Por último se menciona la aplicación de la electrónica en el campo de la medicina y sus avances en nanotecnología.

En el segundo capítulo se presenta la teoría sobre la morfología de un robot, haciendo mención sobre las estructuras mecánicas, las transmisiones, los reductores, actuadores, sensores eléctricos y los efectores que le dan forma al robot.

En el tercer capítulo se brindan los principios de la cinemática y la dinámica de un robot, comenzando con las definiciones de localización espacial mediante la posición y orientación representadas con coordenadas y matrices de transformación homogénea, para luego analizar los movimientos de cinemática y dinámica del robot en un plano.

En el cuarto capítulo se dan los fundamentos de la marcha humana dando a conocer los movimientos de las extremidades inferiores, las fases de apoyo y balanceo y las fuerzas que actúan en el ciclo de la marcha humana.

En el último capítulo se realiza el diseño del exoesqueleto robótico, proporcionando las consideraciones y dispositivos a utilizar en los diseños mecánicos, electrónicos y los sistemas de control, para luego hacer un análisis de la cinemática del prototipo robótico con el fin de que pueda operar en un margen de la marcha humana, en el plano sagital.

OBJETIVOS

General

Elaborar el diseño de un exoesqueleto robótico para discapacitados de un miembro inferior.

Específicos

1. Presentar los antecedentes y fundamentos de la robótica, la anatomía del cuerpo humano y la aplicación de la electrónica en el campo de la medicina.
2. Explicar la morfología de un robot dando a conocer las diferentes secciones que le dan forma al prototipo.
3. Definir y explicar los fundamentos sobre la localización espacial, la cinemática y la dinámica de un robot.
4. Explicar los fundamentos de la marcha humana que hacen posible que una persona pueda movilizarse con sus miembros inferiores.
5. Realizar y explicar los diseños mecánicos, electrónicos y los sistemas de control para el exoesqueleto robótico.

INTRODUCCIÓN

El ser humano se ha sentido fascinado por las máquinas capaces de imitar las funciones y los movimientos de los seres humanos como los robots, que fueron descubiertos desde hace varios siglos y puestos de moda por Isaac Asimov (1945) mediante el anuncio de las tres leyes de la robótica y cuyo propósito es ayudar al ser humano en tareas complejas.

Las máquinas y la mecanización, han incrementado la fuerza muscular; la computadora ha incrementado el poder mental y los sentidos del hombre se han ampliado por medio de instrumentos y dispositivos eléctricos de medición, llegando a que los robots reemplacen las capacidades humanas en su mayoría.

Dentro de la robótica, como campo especial de la medicina, las prótesis inteligentes han evolucionado mediante la creación de prototipos que ayuden y/o reemplacen partes del cuerpo humano, tal es el caso de los exoesqueletos que se usan para rehabilitar personas paraplégicas o en la sustitución de alguna extremidad del cuerpo humano para que este pueda realizar las funciones sin problema alguno.

En el presente trabajo de graduación se diseña un exoesqueleto robótico para que reemplace un miembro inferior en personas con discapacidad en alguno de sus miembros inferiores por causas de accidentes o patologías derivadas por alguna enfermedad, a manera de atender y brindar una solución mediante la tecnología, que pueda devolverles la confianza y poder ser útiles a la sociedad.

1. ANTECEDENTES Y FUNDAMENTOS SOBRE ROBÓTICA, ANATOMÍA HUMANA Y LA ELECTRÓNICA EN LA MEDICINA

1.1. Antecedentes históricos

La historia de la tecnología está formada por tres períodos principales como la era agrícola, industrial y de la información. El desarrollo de los robots se puede ver como lógica e importante parte de la historia.

En la historia, la tecnología de cada época ha sido poderosamente influyente en la vida cotidiana de sus sociedades. Los productos y la ocupación han sido dictados por la tecnología disponible; por ejemplo, en la era agrícola cuya tecnología era muy primitiva, estaba formada por herramientas muy simples que, sin embargo eran lo último en tecnología; como consecuencia de ello la mayoría de la gente eran agricultores y todo el trabajo se hacía mediante la fuerza de los hombres y de los animales.

En la mitad del siglo XX surgen las industrias basadas en las ciencias. Las mejoras tecnológicas en la electrónica hicieron posible la computadora, el cual ha sido el desarrollo más importante de los últimos tiempos y revolucionó el modo de procesar y comunicar la información, que se ha convertido en un medio más del mercado y esta nueva era se le conoce como la era de la información o postindustrial. La tecnología de la información tiene un gran impacto en la sociedad. La computadora, la fibra óptica, la radio, la televisión y los satélites de comunicación son ejemplos de dispositivos que tienen un enorme efecto sobre la vida y la economía.

La tecnología de la información ha sido responsable del crecimiento de la robótica, y a medida que la era industrial declina, se espera que cada vez más trabajo físico sea realizado por los robots.

En la historia, el ser humano se ha sentido fascinado por las máquinas y dispositivos capaces de imitar las funciones y los movimientos de los seres vivos. Los griegos tenían una palabra específica para denominar a estas máquinas, le decían automatos. De esta palabra deriva el nombre de autómeta, que es una máquina que imita la figura y movimientos de un ser animado. Los mecanismos animados de Herón de Alejandría (85 d.C.) se movían a través de dispositivos hidráulicos, poleas, palancas y tenían fines eminentemente lúdicos.

La cultura árabe (siglos VIII a XV) heredó y difundió los conocimientos griegos, utilizándolos no solo para realizar mecanismos destinados a la diversión, sino que les dio una aplicación práctica, introduciéndolos en la vida cotidiana. Ejemplo de estos son diversos sistemas dispensadores automáticos de agua para beber o lavarse. También de ese período son otros autómetas, como el Hombre de Hierro de Alberto Magno (1204 - 1282) o la Cabeza Parlante de Roger Bacon (1214 - 1294). Otro ejemplo relevante de aquella época fue el Gallo de Estrasburgo (1352). Este, que es el autómeta más antiguo que se conserva en la actualidad, formaba parte del reloj de la torre de la catedral de Estrasburgo y al dar las horas movía las alas y el pico.

En los siglos XVII y XVIII se crearon ingeniosos mecanismos que tenían alguna de las características de los robots actuales. Estos autómetas representan figuras humanas y animales. Son destacables entre otros el pato de Vaucanson y los muñecos de la familia Droz y de Mailladert.

Jacques Vaucanson (1738), autor del primer telar mecánico, construyó varios muñecos animados, entre los que destaca un flautista capaz de tocar varias melodías y un pato (1738) capaz de graznar, beber, comer, digerir y evacuar la comida.

El relojero suizo Pierre Jaquet Droz (1721 - 1790) y sus hijos Henri-Louis y Jaquet construyeron diversos muñecos capaces de escribir (1770), dibujar (1772) y tocar diversas melodías en un órgano (1773).

A finales del siglo XVIII y principios del XIX se desarrollaron algunas ingeniosas invenciones mecánicas, utilizadas fundamentalmente en la industria textil, entre las que destacan la hiladora giratoria de Hargreaves (1770), la hiladora mecánica de Crompton (1779), el telar mecánico de Cartwright (1785) y el telar de Jacquard (1801). Este último utilizaba una cinta de papel perforada como un programa para las acciones de la máquina. Es a partir de este momento cuando se empiezan a utilizar dispositivos automáticos en la producción, dando paso a la denominada automatización industrial.

Tabla I. **Autómatas famosos**

Año	Autor	Autómata
1352	Desconocido	Gallo de la catedral de Estrasburgo
1499	Leonardo Da Vinci	El león mecánico
1525	Juanelo Turriano	El hombre de palo
1738	Jacques Vaucanson	Flautista, tamborilero, pato y muñecas mecánicas
1769	W. Von Kempfen	El jugador de ajedrez
1770	Familia Droz	Escriba, organista, dibujante
1805	Henry Maillardet	Muñeca mecánica capaz de dibujar

Fuente: elaboración propia.

1.2. Definición y clasificación de un robot

El término robot fue usado en 1921, cuando el escritor checo Karel Capek estrenó en el teatro nacional de Praga su obra Rossum's Universal Robot (RUR), de la cual deriva de la palabra eslava robota, que se refiere al trabajo realizado de manera forzada.

Los robots de RUR eran máquinas androides fabricadas a partir de la fórmula obtenida por un brillante científico llamado Rossum; estos servían a sus jefes humanos desarrollando todos los trabajos físicos, hasta que finalmente se rebelan contra sus dueños, destruyendo toda la vida humana, a excepción de uno de sus creadores, con la frustrada esperanza de que les enseñe a reproducirse. Sin embargo fue el escritor americano de origen ruso Isaac Asimov el máximo impulsor de la palabra robot, quien en 1945 publicó en la revista *Galaxy Science Fiction* (Galaxia de ciencia ficción) una historia en la que por primera vez enunció sus tres leyes de la robótica.

- Un robot no puede perjudicar a un ser humano, ni con su inacción permitir que un ser humano sufra daño.
- Un robot ha de obedecer las órdenes recibidas de un ser humano, excepto si tales órdenes entran en conflicto con la primera ley.
- Un robot debe proteger su propia existencia mientras tal protección no entre en conflicto con la primera o segunda ley.

Se le atribuye a Isaac Asimov la creación del término *robotics* (robótica) y sin lugar a duda, desde su obra literaria, ha contribuido decisivamente a la divulgación y difusión de la robótica.

El ser humano descubrió e inventó las herramientas para sus necesidades convirtiéndose en tecnólogo; esto es la marca distintiva de todos los seres habitantes de este planeta. Las herramientas han aumentado la capacidad humana y cuando el ser humano fabrica herramientas, es porque tiene en mente el uso de ellas para realizar procesos forzosos y peligrosos nombrándolas máquinas, en las cuales obedece a ciertos patrones para realizar una tarea específica; es por ello que las máquinas y la mecanización han incrementado la fuerza muscular.

La computadora por su parte ha incrementado el poder mental; los sentidos del hombre se han ampliado por medio de instrumentos y dispositivos de medición.

El robot en la actualidad tiene una notoria ampliación de sus campos de aplicación en talleres y líneas de fabricación. Por ello que buena parte de las definiciones y clasificaciones de robots existentes se conocen como robots industriales de producción.

1.2.1. Tipos de robots

En la actualidad existen varios tipos de robot para diferentes aplicaciones, para los cuales se hace mención de los siguientes:

1.2.1.1. El robot androide

Es una máquina que se parece y actúa como si fueran seres humanos. Actualmente no existen en realidad, solamente son elementos en las películas de ciencia ficción.

1.2.1.2. El robot móvil

Es una máquina que tienen ruedas, orugas o patas como medio que les permite desplazarse de acuerdo con la programación a la que fueron sometidos, haciendo uso de sensores para captar información de un entorno, procesar, tomar una decisión y actuar.

Estos robots se usan en instalaciones industriales para transporte de mercadería en cadenas de producción, así como también son útiles para investigar zonas muy distantes o difíciles de acceder.

1.2.1.3. El robot industrial

Es un robot definido como un manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas.

Tabla II. Clasificación de robots industriales

Tipos de robots	Características
ROBOT A	Manipulador con control de manual o telemando
ROBOT B	Manipulador automático con ciclos preajustados Regulación mediante fines de carrera Control por PLC Accionamiento neumático, eléctrico y hidráulico
ROBOT C	Robot programable con trayectoria continua o punto a punto Carece de conocimientos sobre su entorno
ROBOT D	Robot capaz de adquirir datos de su entorno, readaptando su tarea en función de estos

Fuente: elaboración propia.

1.2.1.4. El robot en la medicina

El robot en la medicina cumple la función básicamente en las prótesis para personas discapacitadas. Estas cuentan con sistemas de mando y se adaptan fácilmente al cuerpo. Generalmente suplantando a aquellos órganos o extremidades, realizando sus funciones y movimientos.

1.2.1.5. El robot teleoperado

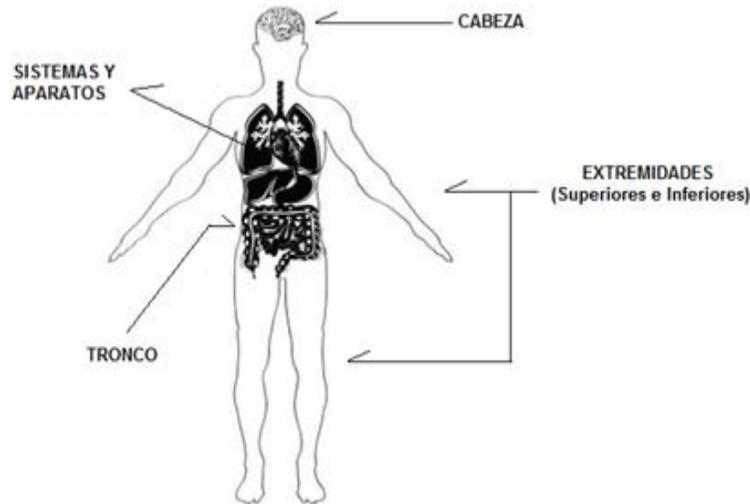
El robot teleoperado se puede definir como dispositivo electromecánico, móvil o estacionario, dotado normalmente de uno o varios brazos mecánicos independientes controlados por un programa de ordenador y que realizan tareas no industriales de servicio.

1.3. Anatomía del cuerpo humano

El cuerpo humano está formado morfológicamente por sistemas y aparatos que en conjunto forman el funcionamiento del ser humano. Se componen de órganos asociados que concurren en una función general y están formados predominantemente por los mismos tipos de tejidos; por ejemplo, el sistema esquelético con sus miembros superiores e inferiores, el sistema cardiovascular, el sistema nervioso, etc.

Los aparatos son el grupo de órganos que desempeñan una función común y sus órganos no tienen predominio de ningún tejido. Dentro de estos se puede mencionar el aparato digestivo, excretor, reproductor, respiratorio, etc. El cuerpo humano también se compone topográficamente de cabeza, tronco y extremidades (superiores e inferiores).

Figura 1. **Topografía y morfología del cuerpo humano**



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.

1.3.1. **La pierna humana**

La pierna humana es el tercer segmento del miembro inferior o pelviano, comprendida entre la rodilla y el tobillo. Se articula con el muslo mediante la rodilla y con el eje mediante el tobillo y se compone de huesos, músculos, sistema vascular y los nervios.

Los huesos que componen la pierna humana son: rótula, tibia, peroné, tarso, metatarso, falanges y el fémur. Mientras que los músculos son: el muscular anterior, extensor y el fibular.

La función principal de la pierna humana es de sustentar el peso del cuerpo en la posición bípeda y hacer posible los desplazamientos mediante la contracción de su musculatura.

Figura 2. **La pierna humana y sus componentes**



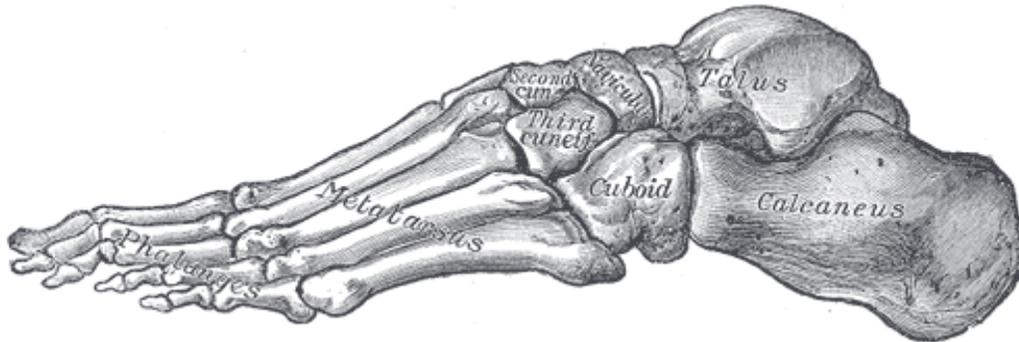
Fuente: <http://www.ecured.cu/index.php/Pierna>. Consulta: mayo de 2013.

1.3.2. El pie humano

El pie humano es la parte terminal de una extremidad que lleva el peso del cuerpo y permite la locomoción y conjuntamente con el tobillo son una fuente y compleja estructura mecánica que contiene 26 huesos, 33 articulaciones, y más de 100 músculos, ligamentos y tendones.

El pie se divide en 3 partes principales que son: el retropié, la parte media y el antepié que se ilustra en la siguiente figura.

Figura 3. **Morfología del pie humano**



Fuente: http://yadyprinse.blogspot.com/p/huesos-del-pie_28.html. Consulta: mayo de 2013.

1.4. Los exoesqueletos y endoesqueletos

Los exoesqueletos son estructuras óseas externas que soporta el cuerpo de un animal artrópodo, mientras que los endoesqueletos son estructuras internas de soporte en un animal vertebrado.

1.4.1. El esqueleto humano

El esqueleto humano es un conjunto de piezas óseas biológicas que proporcionan al cuerpo humano una firme estructura multifuncional como locomoción, protección, contención, sustento, etc. Está formado por aproximadamente 206 huesos.

Los huesos están formados por unas células denominadas osteocitos, que se forman a partir de la diferenciación de los osteoblastos, cuyos minerales destacan las sales de calcio, carbonatos y fosfatos. Los sistemas esqueléticos se clasifican comúnmente endoesqueleto (esqueleto interno) y exoesqueleto (esqueleto externo).

1.4.2. El endoesqueleto

El endoesqueleto es una estructura interna de soporte de un animal, permitiendo la fijación de músculos y tendones además de proteger el sistema nervioso, como las costillas del ser humano.

Figura 4. **Las costillas del ser humano**



Fuente: http://es.123rf.com/photo_9877018_anatomia-del-torax.html. Consulta: mayo de 2013.

1.4.3. El exoesqueleto

Es el conjunto de huesos que forman una cubierta externa como un caparazón que protege a los órganos internos, soporta menos peso, es duro y resistente; como los animales artrópodos que poseen un exoesqueleto formado por quitina que cubre el cuerpo entero y cuya cutícula es dividida en placas separadas, permitiendo el movimiento del animal. Los artrópodos de vida aérea, como los insectos o los arácnidos, el exoesqueleto se continúa hacia las cavidades respiratorias (pulmones o tráqueas) y es allí donde estas se abren al exterior, tapizándolas.

Figura 5. **El exoesqueleto de un insecto artrópodo**



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Exoesqueleto>. Consulta: mayo de 2013.

1.4.4. Los exoesqueletos artificiales

En la actualidad, con el avance de la tecnología, se cuenta con prototipos de exoesqueletos artificiales, que por lo general en su mayoría son para el uso en la terapia médica y rehabilitación de personas parapléjicas por enfermedades o accidentes en la columna vertebral o por trastornos mentales para que el ser humano pueda realizar trabajo de levantamiento de objetos pesados y exploradores en sitios difícilmente transitables, como por ejemplo en el espacio. En las siguientes figuras se ilustran los distintos exoesqueletos artificiales en diferentes aplicaciones.

Figura 6. **Exoesqueleto para rehabilitación de personas con discapacidad inmóvil**



Fuente: <http://actualidad.rt.com/ciencias/view/55939-nasa-crea-exoesqueleto-ayuda-caminar-espacio-tierra>. Consulta: abril de 2013.

Figura 7. **Exoesqueleto para sustituir extremidades del cuerpo humano**



Fuentes: <http://nellytec.blogspot.com/2011/02/protesis-ortesis-d-ecidi-esta-entrada.html>.
http://puebla.quebarato.com.mx/puebla-de-zaragoza/protesis-de-pierna-y-brazo__4B635C.html.
Consulta: abril de 2013.

Figura 8. **Exoesqueleto para proporcionar fuerza al ser humano**



Fuente: <http://www.neoteo.com/iron-man-posible-en-el-mundo-real>. Consulta: abril de 2013.

Figura 9. **Exoesqueleto para trabajos especiales**



Fuente: <http://actualidad.rt.com/ciencias/view/55939-nasa-crea-exoesqueleto-ayuda-caminar-espacio-tierra>. Consulta: abril de 2013.

1.5. La electrónica en el campo de la medicina

El avance en la medicina se debe en gran parte al uso de la tecnología mediante las herramientas más sofisticadas fabricadas con electrónica que permite procesar señales en tiempo real y facilitan hacer procesos para detectar males en el cuerpo humano y así poder diagnosticar y curar cierta enfermedad, que antes no se podían realizar debido a que la instrumentación medica era muy rudimentaria para detectar enfermedades muy complejas.

1.5.1. Reseña histórica de la electrónica

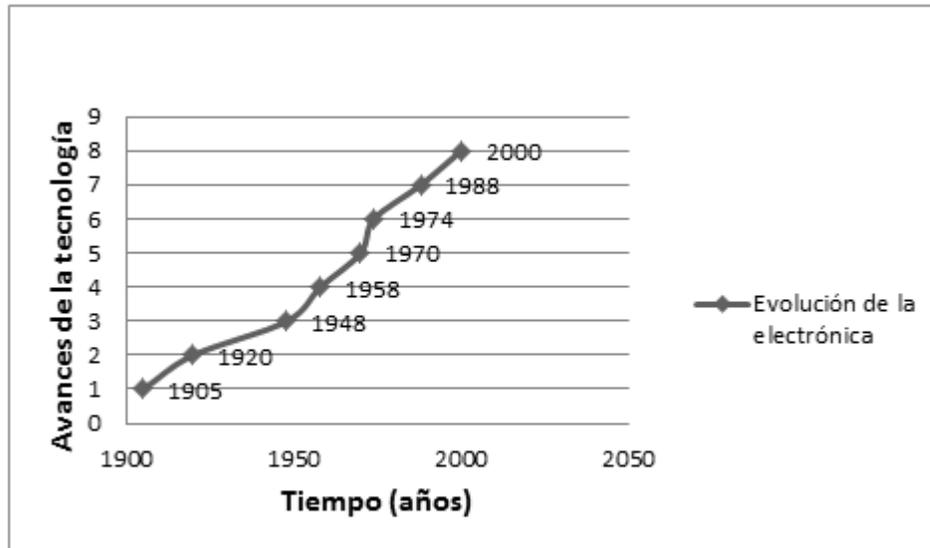
La electrónica es la rama de la física aplicada al estudio de los electrones y su manipulación en sistemas cuyo funcionamiento se basa en la conducción y control de flujo microscópico de los electrones. Asimismo ha tenido un auge muy importante desde el descubrimiento de los tubos al vacío inventados por John Ambrose Fleming en 1904; luego el transistor inventado por Bardeen y Brattain de la Bell Telephone Company en 1948 y por supuesto el circuito integrado desarrollado en 1958, alojando 6 transistores en un encapsulado o chip y que en 1970 se desarrolló el primer microprocesador de Intel 4004.

Paralelamente en 1940 se realizaron trabajos acerca de la transferencia de cargas eléctricas entre moléculas por Robert Mulliken y Albert Szent - Gyorgi. Sin embargo, el primer dispositivo moletrónico (molécula electrónica) fue desarrollado en 1974 como un biestable de malanina. En 1988 fue descrita una molécula capaz de actuar como un transistor de efecto de campo.

Los recientes avances en estudios a nivel molecular y el descubrimiento de polímeros conductores y semiconductores merecedores del premio Nobel de Química del año 2000, han permitido avances espectaculares en la materia. Dispositivos como los diodos orgánicos emisores de luz (OLED por sus siglas en inglés), transistores orgánicos de efecto de campo (OFET por sus siglas en inglés) o paneles solares orgánicos, son ya conocidos en la industria.

Las principales ventajas de la electrónica molecular frente a la electrónica tradicional basada en materiales inorgánicos como el silicio, son facilidad de fabricación, maleabilidad, bajo coste y mayor escala de integración. Actualmente recibe el nombre de nanoelectrónica. En la siguiente figura se muestra la evolución que ha tenido la electrónica en los últimos años.

Figura 10. **Evolución del campo de la electrónica**



Fuente: elaboración propia.

1.5.2. **La electrónica en la medicina**

La electrónica ha avanzado tan rápido que su aplicación ha impactado en todos los ámbitos sociales, comenzado por el uso de los electrodomésticos, la domótica, la robótica, la electrónica digital, la electromedicina, las telecomunicaciones, el procesamiento de señales, los MEMS y actualmente se está iniciando una nueva revolución a nivel molecular llamada nanoelectrónica; la cual tiene como objetivo manipular a nivel nano (milmillonésima parte de algo) las partículas de cualquier átomo que sigan un patrón de conducta, con base en la excitación de fuerzas mecánicas, químicas o biológicas, cuyo objetivo sean realizar un determinado trabajo.

El campo de la medicina ha evolucionado bastante actualmente con la ayuda de la tecnología electrónica que se ha inclinado por el perfeccionamiento

y mejoramiento de la medicina tradicional, ya que esta tiene muchas dificultades como lo complicado de no poder llegar a partes específicas del cuerpo. También que los medicamentos que se introducen en el cuerpo no puedan expandirse por completo.

Los recientes estudios en nanociencia permiten dar una solución viable a la curación de enfermedades mediante la nanotecnología. De igual manera la electrónica ha ayudado a desarrollar prótesis de piernas, manos y brazos; incluso en el mundo ya existen corazones electrónicos y órganos de vital importancia que pueden ser reemplazados.

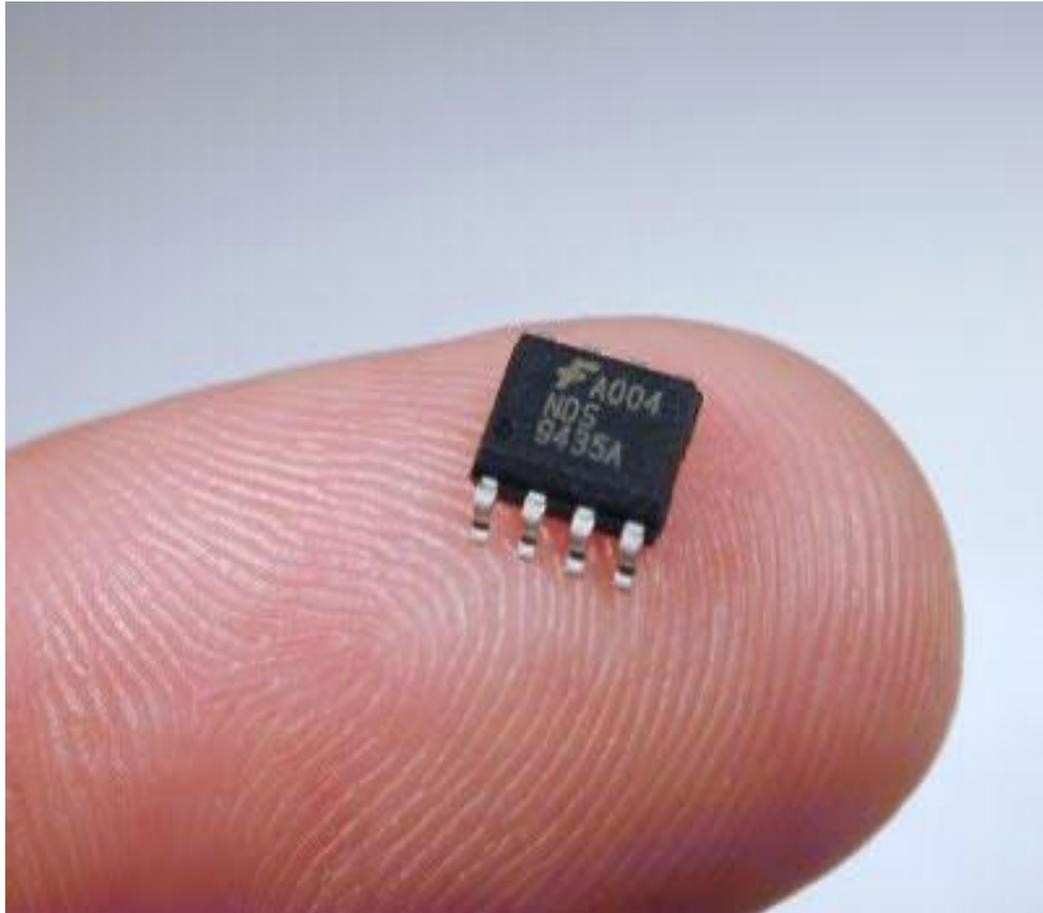
1.5.3. La nanotecnología y nanoelectrónica

El concepto de nanotecnología engloba aquellos campos de la ciencia como la física, química, mecánica, electrónica, etc., y la técnica con las que se estudian, obtienen o manipulan de manera controlada los materiales, sustancias y dispositivos de muy reducidas dimensiones, en general inferiores a la micra, es decir a escala nanométrica (mil millonésima parte de un metro) mediante el uso de las técnicas de *Top - Down* y *Bottom - Down*.

La técnica de nanotecnología *Top-Down* se basa en la reducción de tamaño, definida como el proceso de comenzar de arriba (mayor) hasta abajo (menor), con el afán de que los mecanismos y las estructuras se miniaturicen a escala nanométrica.

El método se usa más concretamente en el ámbito de la electrónica donde predomina la miniaturización, como los dispositivos MEMS (Microelectromechanical Systems) usados comúnmente en la electrónica de consumo como los electrodomésticos entre otros.

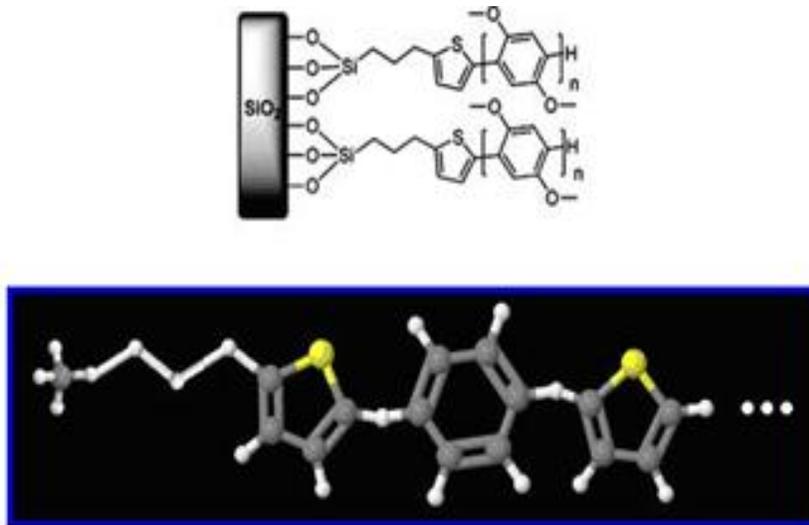
Figura 11. **Miniaturización de la electrónica mediante la técnica de *Top - Down***



Fuente: <http://investirdinheiro.org/escala-nanometrica-materiais-nanoestruturados-nanotecnologia/>. Consulta: mayo de 2013.

La técnica de nanotecnología *Bottom - Up*, se define como el proceso de comenzar desde abajo (menor) hasta arriba (mayor), con el propósito de crear una estructura nanométrica partiendo de una molécula y mediante un proceso de montaje o autoensamblado, creando un mecanismo mayor que el mecanismo de inicio.

Figura 12. **Lámina metálica de dióxido de silicio para hacer crecer polímeros orgánicos usando la técnica de nanotecnología *Bottom – Up***



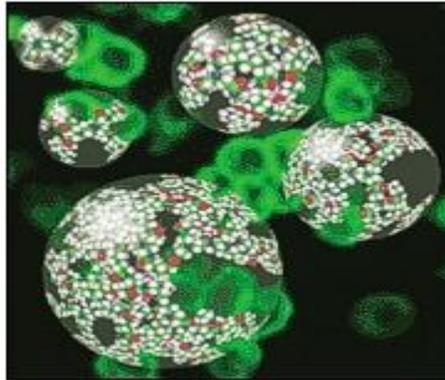
Fuente: <http://blogs.creamoselfuturo.com/nano-tecnologia/2010/05/>. Consulta: mayo de 2013.

1.5.4. La nanotecnología en la medicina

En el universo de los convalecientes, la persona que está enferma, el anciano y el herido sufren desorganización de los átomos, provocada por un ente llamado virus. El combate de la enfermedad a escala molecular permite detectar precozmente la enfermedad, identificar y atacar de forma más específica a las células cancerígenas, si este fuera el caso.

En la administración de medicamentos, las nuevas técnicas son ya un hecho, hay nanosistemas de liberación de fármacos que actúan como transportadores de medicamentos a través del organismo que llegan al virus para eliminarlo sin alterar nada alrededor del cuerpo humano.

Figura 13. **Nanopartículas transportando fármacos**



Fuente: <http://www.portalciencia.net/nanotecnologia/nanomedicina.html>. Consulta: mayo de 2013.

En la misma línea de la nanotecnología, en la medicina se hace mención del estudio para desarrollar un tipo de músculo artificial basado en nanotubos de carbono, mediante la transformación de redes de nanotubos de carbono en aerogeles, donde los mismos presentan una densidad de 1.5 mg/cm^3 , logrando alcanzar velocidades de hasta 2 m/s. Dicha investigación, inició con un material que consiste en un arreglo de nanotubos de carbono, verticalmente alineados, conocidos también como redes, debido a que los nanotubos están alineados como árboles.

Los nanotubos alineados se pueden transformar en láminas de aerogel de nanotubos de carbono. Debido a las excelentes propiedades que estos materiales manifiestan, los terminales pueden expandirse rápidamente, contraerse en cuestión de segundos o simplemente volverse más duros que el acero, debido a una carga eléctrica dirigida hacia ellos.

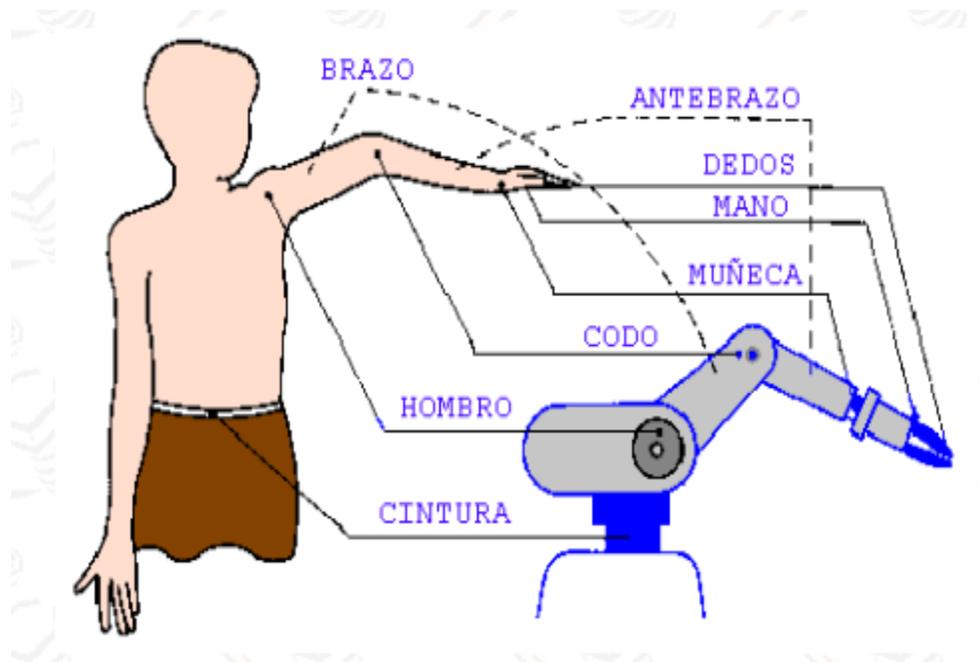
El avance de esta tecnología está dando mucho de qué hablar en las nuevas prótesis para personas discapacitadas, debido a que pueden ser inteligentes, resistentes y flexibles.

2. TEORÍA DE LA MORFOLOGÍA DE UN ROBOT

2.1. La morfología de un robot

La morfología que presenta un robot está compuesta por una estructura mecánica, las transmisiones, los reductores, actuadores, sensores, el sistema de control y los elementos terminales. La constitución física de la mayoría de los robots tiene cierta similitud con la anatomía de las extremidades superiores del cuerpo humano, tal y como se observa en la figura de abajo.

Figura 14. **Analogía de un robot industrial y el brazo de un ser humano**



Fuente: http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/sistema/morfologia.htm.

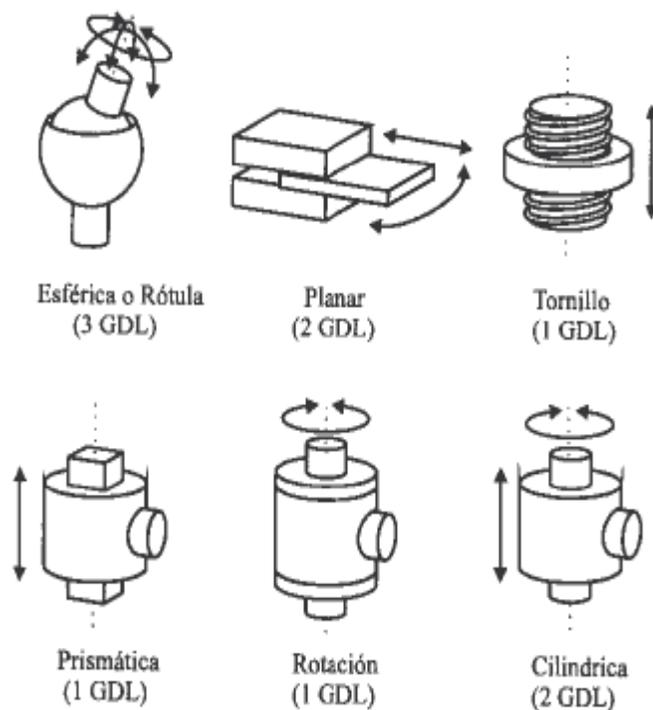
Consulta: junio de 2013.

2.1.1. La estructura mecánica de un robot

La parte mecánica de un robot está formada por una serie de eslabones unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos. El movimiento de cada articulación puede ser de desplazamiento (prismático), giro (rotación), o una combinación de ambos.

En la figura se observan seis tipos diferentes de articulaciones para un robot.

Figura 15. Tipos diferentes de articulaciones

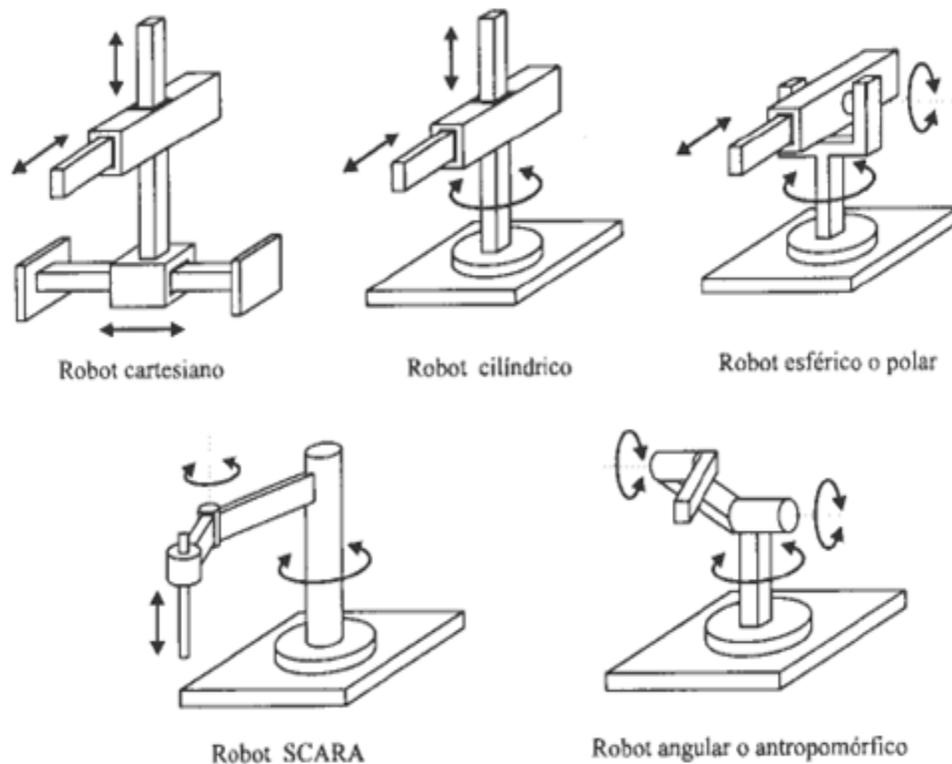


Fuente: BARRIENTOS, Antonio. *Fundamentos de robótica*. p. 17.

El movimiento independiente que puede realizar cada articulación respecto de la anterior, se denomina grado de libertad (GDL). El número de grados de libertad del robot viene dado por la suma de los grados de libertad de las articulaciones que lo componen.

La posición y orientación de un cuerpo en el espacio requieren por lo regular de seis parámetros; tres para definir la posición y tres para la orientación, si se pretende que un robot posicione y oriente su extremo (y con él la pieza o herramienta manipulada) de cualquier modo, en el espacio se precisarán al menos seis grados de libertad.

Figura 16. **Configuraciones frecuentes de los robots industriales**



Fuente: BARRIENTOS, Antonio. *Fundamentos de robótica*. p. 18.

2.1.2. Las transmisiones de un robot

La transmisión de un robot es la parte encargada de transmitir el movimiento desde los actuadores hasta las articulaciones. Asimismo, pueden ser utilizadas para convertir movimiento circular en lineal o viceversa, cuando sea necesario, deben de cumplir con características importantes como el tamaño, peso reducido, juegos u holguras considerables, rendimiento, etc.

En la siguiente tabla se muestran sistemas de transmisión específicos para robots usados con mayor frecuencia.

Tabla III. **Sistemas frecuentes de transmisión para robots**

Entrada - salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular- circular	Engranajes	Pares altos	Holguras
	Correa dentada	Distancia grande	-----
	Cadena	Distancia grande	Ruido
	Paralelogramo	-----	Giro limitado
	Cable	-----	Deformabilidad
Circular - lineal			
	Tornillo sin fin	Poca holgura	Rozamiento
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento
Lineal - circular	Paral articulado	-----	Control difícil
	Cremallera	Holgura	Rozamiento

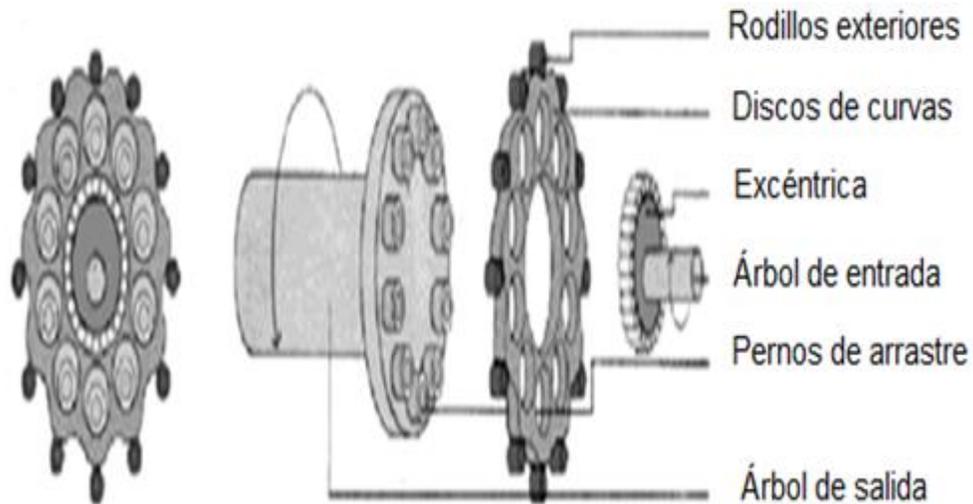
Fuente: BARRIENTOS, Antonio. *Fundamentos de robótica*. p. 20.

2.1.3. Los reductores de un robot

El reductor de un robot tiene la función de adaptar el par y la velocidad de salida del actuador a los valores adecuados para el movimiento de los eslabones del robot, cumpliendo con propiedades como el bajo peso, tamaño, rozamiento, momento de inercia mínima, holgura mínima, alta rigidez torsional, entre otras.

En la siguiente figura se muestra un reductor tipo CYCLO con sus respectivas partes.

Figura 17. Reductor de tipo CYCLO



Dibujo esquemático

Fuente: http://www.elai.upm.es/moodle/pluginfile.php/1468/mod_resource/content/0/Tema2_MorfologiaDelRobot.pdf. Consulta: junio de 2013.

En la siguiente tabla se presentan las características más relevantes de los reductores de un robot.

Tabla IV. **Características importantes en un reductor de un robot**

Características	Valores típicos
Relación de reducción	50 - 300
Peso y tamaño	0.1 - 30 Kg
Velocidad de entrada máxima	10 E -4 Kg m ²
Par de salida nominal	5700 Nm
Par de salida máximo	7900 Nm
Juego angular	0 - 2 "
Rigidez torsional	100 – 2000 Nm/rad
Rendimiento	85 % - 98 %

Fuente:http://www.elai.upm.es/moodle/pluginfile.php/1468/mod_resource/content/0/Tema2_MorfologiaDelRobot.pdf. Consulta: junio de 2013.

2.1.4. Los actuadores de un robot

El actuador es el encargado de generar el movimiento según las órdenes dadas por la unidad de control. Los tipos de actuadores que generalmente se usan en un robot son los que emplean la energía neumática, hidráulica o eléctrica.

2.1.4.1. El actuador neumático

El actuador neumático se basa en el funcionamiento por aire a presión, generalmente entre 5 y 10 bar. Por lo regular existen dos tipos de actuadores neumáticos que son los cilindros y los motores detallados a continuación:

- Los cilindros neumáticos: el cilindro neumático es de aproximadamente 1 a 3 pulgadas de diámetro, que tienen émbolos por adentro que se

desplazan como resultado del empuje ejercido por el aire a presión, mediante mecanismos (muelles) de simple efecto o de doble efecto. En los cilindros de simple efecto el aire desplaza al émbolo en una sola dirección y cuando no hay aire a presión, el émbolo retorna a su posición inicial debido al efecto del muelle (resorte). En los cilindros de doble efecto, el aire a presión es el encargado de empujar al émbolo en las dos direcciones y no tiene muelle (resorte).

- Los motores neumáticos: el motor neumático realiza un movimiento de rotación en un eje mediante aire a presión. Los dos tipos más usados son los motores de aletas rotativas y los motores de pistones axiales. El motor de aletas rotativas tiene un rotor excéntrico en donde están dispuestas las aletas de longitud variable, que al entrar aire a presión en uno de los compartimentos estas tienden a girar hacia una situación en la que el compartimento tenga mayor volumen. El motor de pistones axiales tiene un eje de giro unido a un tambor que se ve obligado a girar por las fuerzas que ejercen varios cilindros apoyados sobre un plano inclinado.

2.1.4.2. El actuador hidráulico

El actuador hidráulico funciona a base de aceites minerales a una presión comprendida normalmente entre los 50 y 100 bar, llegando en ocasiones a superar los 300 bar. Hay dos tipos de actuadores hidráulicos que son los cilíndricos y los motores de aletas y pistones. Sin embargo el grado de compresibilidad de los aceites usados es inferior al aire a presión; por lo tanto la precisión obtenida en este caso es mayor, permitiendo elevadas presiones de trabajo como fuerza y par mecánico y mejor estabilidad a cargas estáticas con relación a los actuadores neumáticos.

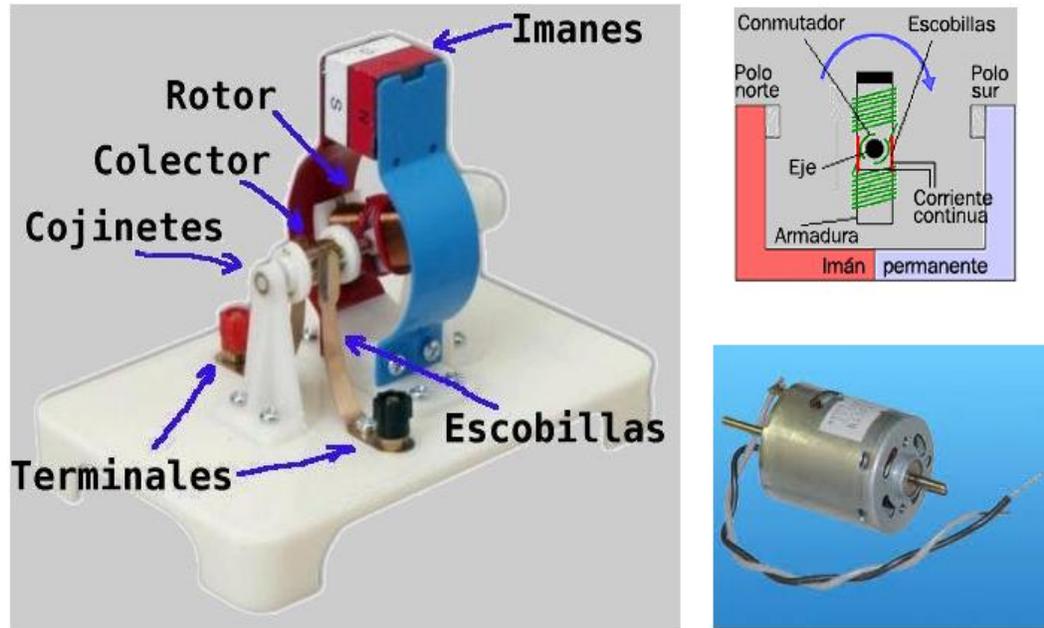
En cierta manera los actuadores hidráulicos tienen algunos inconvenientes por las elevadas presiones como las fugas de aceite a lo largo de la instalación e instalaciones más complicadas, ya que se necesita de equipos de filtrado de partículas, eliminación de aire, sistemas de refrigeración y unidades de control de distribución. Los accionamientos hidráulicos se usan con frecuencia en aquellos robots que deben manejar grandes cargas.

2.1.4.3. El actuador eléctrico

El actuador eléctrico, a diferencia de los neumáticos y los hidráulicos, usan corriente eléctrica para el funcionamiento de los dispositivos. Las características de control, sencillez y precisión de los accionamientos eléctricos hacen que sean los más usados en los robots actuales. Generalmente hay tres tipos de actuadores eléctricos que son los motores de corriente continua (DC), de paso a paso (Pap) y de corriente alterna (AC):

- El motor de corriente continua (DC): está compuesto por una parte llamada estator y otra llamada rotor, teniendo devanados internos denominados comúnmente inductor (devanado de excitación) e inducido. El inductor está situado en el estator del motor y crea un campo magnético de dirección fija denominada de excitación. Mientras que el inducido está situado en el rotor del motor que se hace girar debido a la fuerza de Lorentz, que aparece como una combinación de la corriente circulante por él mismo y del campo magnético de excitación. En los motores de corriente continua existe una conversión de energía eléctrica a energía mecánica de forma continua, logrando que mediante campos magnéticos en el estator y el rotor permanezcan estáticos entre sí, obteniendo una transformación máxima cuando ambos campos se encuentran en cuadratura.

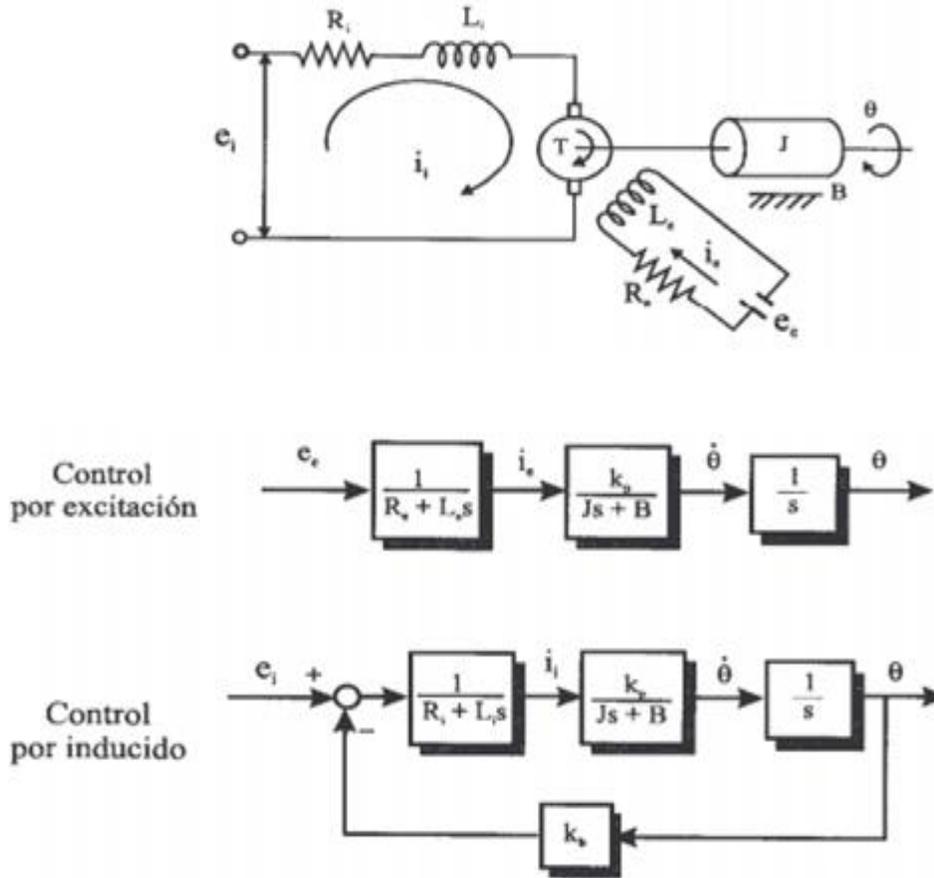
Figura 18. Partes de un motor de corriente continua (DC)



Fuente: <http://www.sabelotodo.org/electrotecnia/motorcolector.html>. Consulta: junio de 2013.

Si se hace un análisis matemático del sistema de control para un motor eléctrico se obtiene una relación entre la tensión de control y la velocidad de giro que se le denomina como la función de transferencia y que es la respuesta a un sistema de primer orden, controlados por el inducido del motor y de segundo orden controlados por la excitación del mismo motor. En las siguientes figuras se observa la representación eléctrica de un motor de corriente continua (DC) y su función de transferencia.

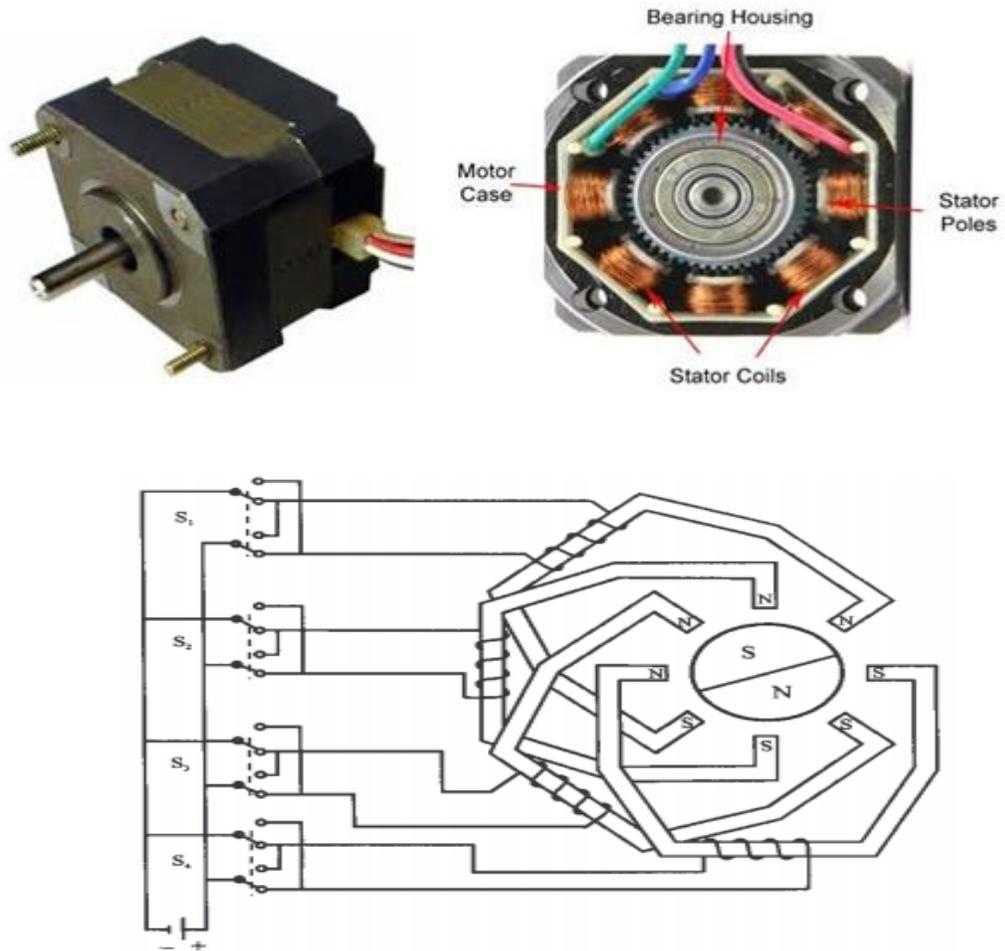
Figura 19. Diagrama eléctrico de un motor DC y su función de transferencia



Fuente: BARRIENTOS, Antonio. *Fundamentos de robótica*. p. 31.

- El motor de paso a paso (Pap): es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, avanzando en una serie de grados (pasos) que dependen de una combinación lógica en sus entradas de control. En la gama de estos motores existen tres tipos que son los de imanes permanentes, reluctancia variable y los híbridos.

Figura 20. Diagrama físico y eléctrico de un motor paso a paso (Pap)



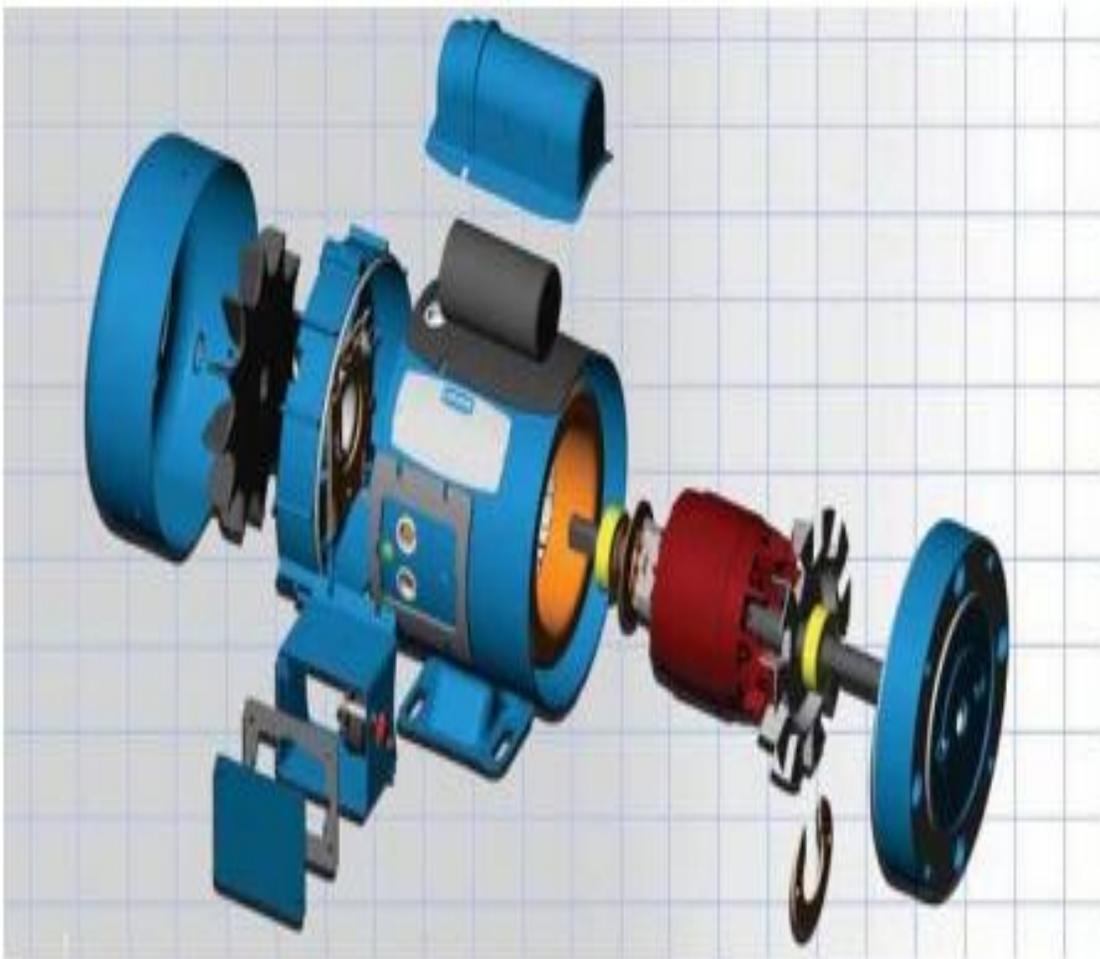
Fuente: <http://www.engineersgarage.com/articles/stepper-motors?page=1>.

Consulta: junio de 2013.

- El motor de corriente alterna (AC): este convierte una forma determinada de energía eléctrica alternante en energía mecánica de rotación o par, mediante la acción mutua de los campos magnéticos. Hay dos tipos de motores de corriente alterna que son los síncronos y los asíncronos. En el motor de corriente alterna el inductor se sitúa en el rotor y está constituido por imanes permanentes, mientras que el inducido situado en

el estator, está formado por tres devanados iguales separados 120° eléctricos, y se alimenta con un sistema trifásico de tensiones. En los motores asíncronos están formados por un rotor que generalmente pueden ser de jaula de ardilla y de bobinado. Mientras que en el estator se encuentran las bobinas inductoras desfasadas entre sí 120° en el espacio.

Figura 21. **El motor de corriente alterna (AC)**



Fuente: http://servicegym.fullblog.com.ar/ciuntas_de_correr__motores_de_corriente_alterna__861194727433.html. Consulta: junio de 2013.

En la siguiente tabla se resumen los tres tipos de actuadores que generalmente se emplean en la robótica y la industria.

Tabla V. **Características de los distintos tipos de actuadores para un robot**

Consideraciones	Neumático	Hidráulico	Eléctrico
Energía	Aire a presión (5 a 10 bar)	Aceite mineral (50 a 100 bar)	Corriente eléctrica
Opciones	Cilindros	Cilindros	Corriente continua
	Motor de paletas	Motor de paletas	Corriente alterna
	Motor de pistón	Motor de pistones axiales	Motor paso a paso
Ventajas	Baratos	Rápidos	Precisos
	Rápidos	Alta relación (potencia/peso)	Fiables
	Sencillos	Autolubricantes	Fácil control
	Robustos	Alta capacidad de carga	Sencilla instalación
		Estabilidad frente a cargas estáticas	Silenciosos
Desventajas	Dificultad de control continuo	Difícil mantenimiento	Potencia limitada
	Instalación especial (compresor y filtros ruidosos)	Instalación especial (filtros y eliminación de aire)	
		Frecuentes fugas	
		Costos altos	

Fuente: elaboración propia.

2.1.5. Los sensores de un robot

En el diseño y la creación de robots, los sensores juegan un importante papel como los dispositivos que recolectan la información de un entorno tanto interno como externo, consiguiendo que el autómatas realice su tarea con la adecuada precisión, velocidad e inteligencia.

La información relacionada con su estado (la posición de sus articulaciones) se consigue con los denominados sensores internos, mientras que en lo referente al estado de su entorno, se adquiere mediante los sensores externos.

2.1.5.1. Los sensores internos

El sensor interno es un dispositivo que opera con la detección de variables para el control de una determinada articulación de un robot. Existen varios tipos de sensores internos como los que se muestran en la siguiente tabla:

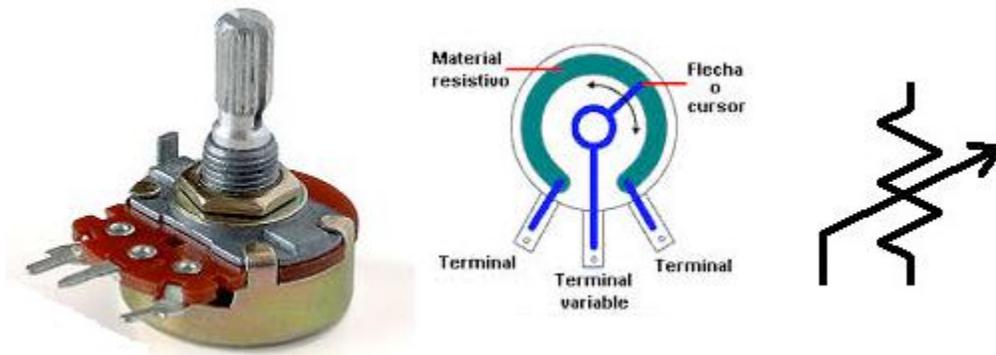
Tabla VI. Tipos de sensores internos en un robot

Presencia	Posición		Velocidad
	Analógicos	Digitales	
Inductivos	Potenciómetros	<i>Encoder</i> absolutos	Taco generatriz
Capacitivos	<i>Resolvers</i>	<i>Encoder</i> incremental	
Efecto Hall	Sincros	Regla óptica	
Ópticos			
Ultrasónicos			
Contactos			

Fuente: elaboración propia.

- El sensor de posición: es un dispositivo acoplado al eje de un motor para medir variables de giro como la velocidad angular (ciclos / segundo), cuyo propósito es el control de la posición angular por parte del autómeta. Entre los sensores de posición están los potenciómetros, *encoders* y *resolvers*.
- El potenciómetro: es un dispositivo cuyo valor de resistencia es variable, manipulada mediante un eje mecánico rotatorio. Asimismo se puede ir controlando indirectamente la intensidad de corriente que fluye por un circuito.

Figura 22. Diagrama físico y eléctrico de un potenciómetro



Fuente: <http://rduinostar.com/documentacion/componentes/potenciometro/>.

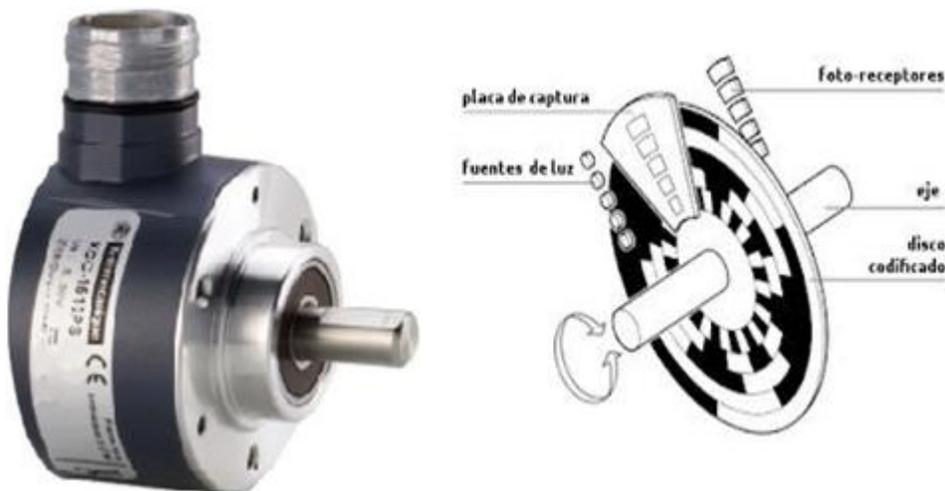
Consulta: julio de 2013.

- Los *encoders*: se clasifican en incrementales y absolutos, cuyo objetivo es medir velocidad angular mediante mecanismos ópticos y discos codificados.
 - El *encoder* incremental: consta básicamente de un disco transparente con una serie de marcas opacas colocadas

radialmente y equidistante entre sí. Así como también de un sistema de iluminación en el que la luz es acoplada y direccionada de forma adecuada hacia un elemento fotorreceptor. La posición del eje a medir va acoplado al disco transparente; a medida que el eje gire se irán generando pulsos en el receptor, cada vez que la luz atraviese una marca; llevando una cuenta de estos pulsos es posible conocer la posición del eje.

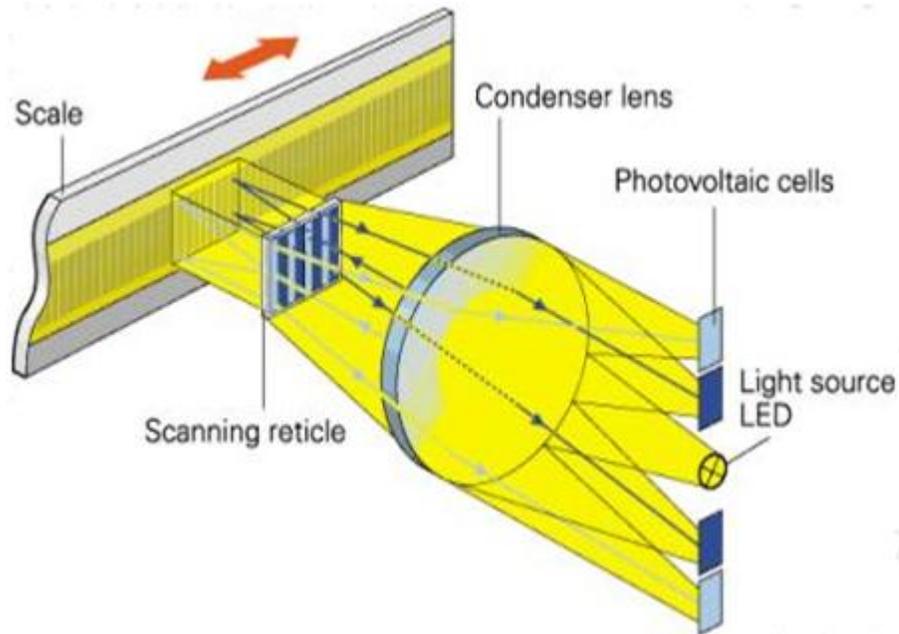
- El *encoder* absoluto: es similar al encoder incremental con la diferencia de que tiene una fuente de luz con las lentes de adaptación correspondientes, un disco graduado transparente que se divide en un número determinado de sectores, codificándose (potencia de 2) cada uno de ellos según un código binario cíclico (código de Gray) y queda representado por zonas transparentes y opacas dispuestamente.

Figura 23. **Diagrama físico de un *encoder***



Fuente: <http://www.lbaindustrial.com.mx/que-es-un-encoder-absoluto/>. Consulta: julio de 2013.

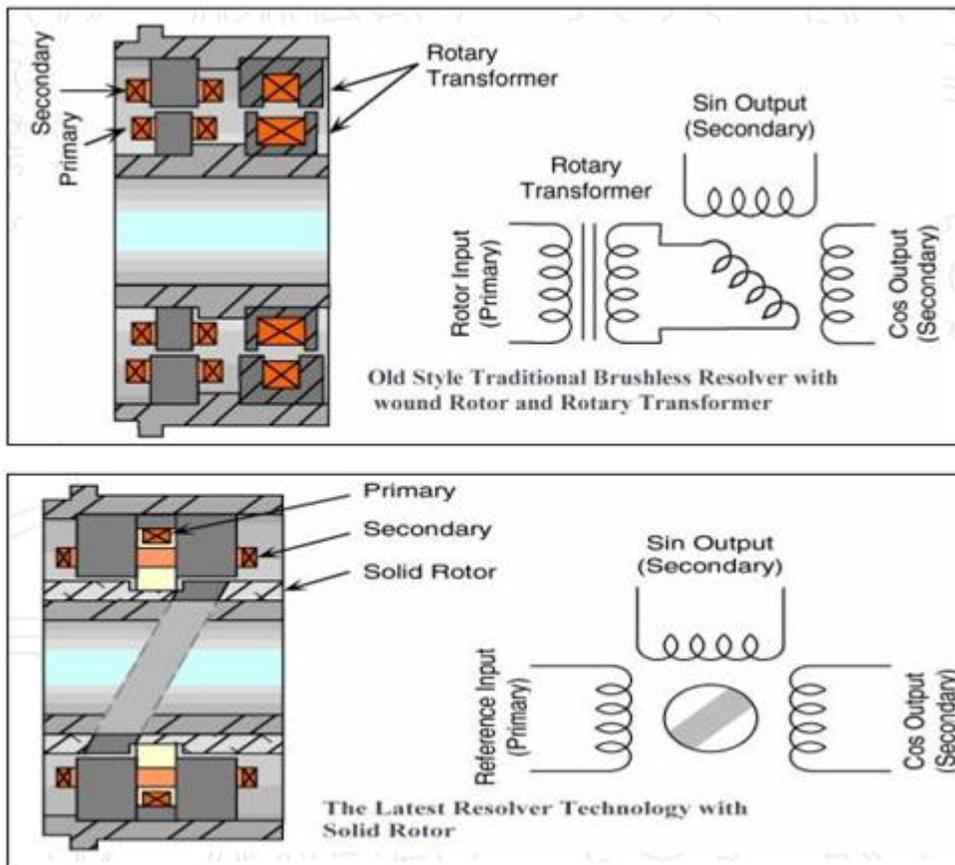
Figura 24. Esquema del funcionamiento de un *encoder*



Fuente: http://www.cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/Sensores. Consulta: julio de 2013.

- El *resolver* también llamado sincro, es un dispositivo analógico cuya resolución es teóricamente infinita. El funcionamiento se basa en la utilización de una bobina sólida al eje, excitada por una portadora generalmente de 400 Hz y dos bobinas fijas situadas a su alrededor. El giro de la bobina móvil hace que el acoplamiento con las bobinas fijas varíe, consiguiendo que la señal resultante en estas dependa del ángulo de giro. La bobina móvil, que es excitada con una tensión y girada a cierto ángulo, induce tensión en las bobinas fijas que están situadas en cuadratura.

Figura 25. Esquema de un *resolver*



Fuente: http://www.cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/Sensores. Consulta: julio de 2013.

- El sensor de velocidad: se usa normalmente para la captura de información relacionada con el cambio de posición angular en función del tiempo, para mejorar el comportamiento dinámico de los actuadores del robot. El sensor usualmente usado es un taco generatriz que proporciona una tensión proporcional a la velocidad de giro de su eje.
- El sensor de presencia: es el dispositivo encargado de detectar el movimiento o presencia de un objeto dentro de un radio de acción determinado con o sin contacto alguno con el objeto. Los sensores

pueden ser los interruptores normalmente abiertos (NO) o normalmente cerrados (NC), según sea el caso, actuando mecánicamente a través de un vástago, los detectores inductivos, capacitivos, dispositivos efecto de Hall y los dispositivos ópticos entre otros.

2.1.5.2. Los sensores externos

El empleo de sensores externos permite la detección de variables como el alcance, la proximidad y el contacto, facilitando a un robot interactuar con su ambiente de una manera flexible para el guiado del mismo, así como para la manipulación e identificación de objetos.

Los sensores externos son comúnmente de contacto y no contacto. El sensor de contacto se basa en el contacto físico, como el tacto, el deslizamiento y la torsión. Mientras que los sensores de no contacto se basan en la respuesta de un detector a las variaciones en la radiación electromagnética o acústica.

2.1.5.2.1. El sensor detección de alcance

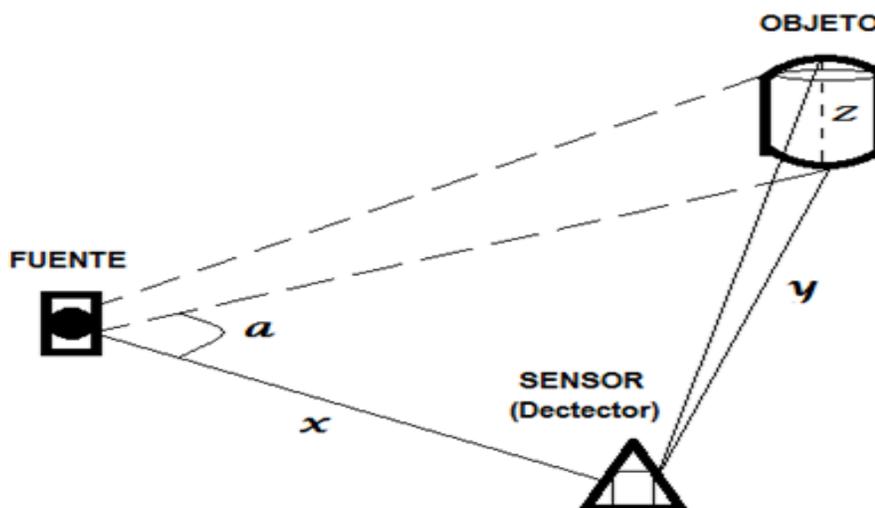
Este mide la distancia desde un punto de referencia hasta objetos en el campo de operación. Estos se utilizan para la navegación y para evitar obstáculos en las que se desean las características de localización y en forma general, de objetos en el espacio.

La triangulación es un procedimiento de aplicación de un sensor de detección, el cual cuenta con una fuente que emite una señal tipo lumínico hacia el objeto, barriendo por completo el mismo.

Al mismo tiempo, un detector colocado a la par de la fuente y a cierta distancia tiene la función de seguir la mancha lumínica del objeto y simultáneamente la emisión de la señal que sale desde la fuente, formando una figura geométrica triangular de la cual puede calcularse el ángulo de la fuente con la línea hacia el objeto y la distancia entre la fuente y el detector.

El método de triangulación proporciona una medida puntual. Si la disposición de fuente y detector se desplaza en un plano fijo (hacia arriba y abajo y en sentido lateral en un plano perpendicular al papel y que contenga la línea de la base en la figura), será posible obtener una serie de puntos cuyas distancias desde el detector serán conocidas. Estas distancias se transforman con facilidad en coordenadas tridimensionales, manteniendo un registro de la localización y orientación de detector a medida que se exploran los objetos. En la siguiente figura se muestra el método de la detección de un objeto por triangulación.

Figura 26. **Método de triangulación para la detección de un objeto**



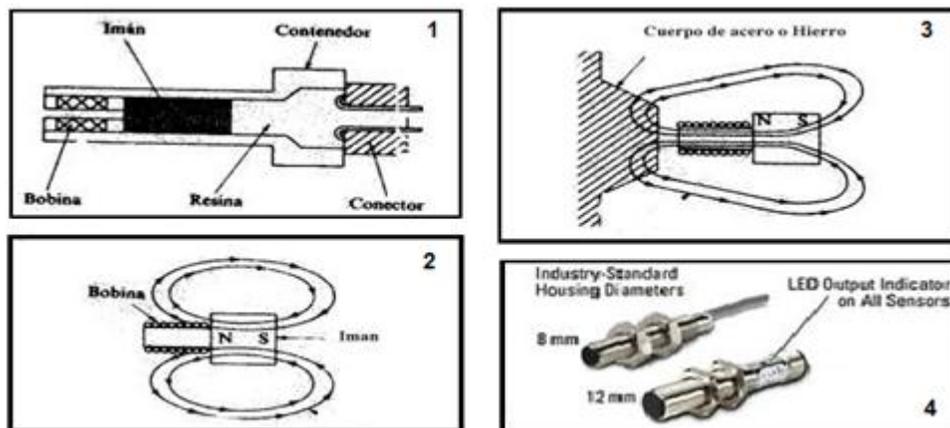
Fuente: elaboración propia.

2.1.5.2.2. El sensor de detección de proximidad

El sensor de proximidad suele dar una salida digital que indica la presencia de un objeto dentro de un intervalo de distancia específico. Dentro de los sensores más comunes están los inductivos, capacitivos, efecto de Hall ultrasónicos y los lumínicos.

- El sensor inductivo: el funcionamiento del sensor es por un cambio de inductancia en presencia de un objeto metálico ferromagnético. En condiciones estáticas el sensor no tiene ningún movimiento de las líneas de flujo magnético y por lo tanto no induce ninguna corriente en la bobina del sensor. Sin embargo, cuando un objeto ferromagnético penetra en el campo del imán o lo abandona, el cambio resultante en las líneas de flujo induce un impulso de corriente, cuya amplitud y forma son proporcionales a la velocidad de cambio de flujo.

Figura 27. Funcionamiento de un sensor inductivo

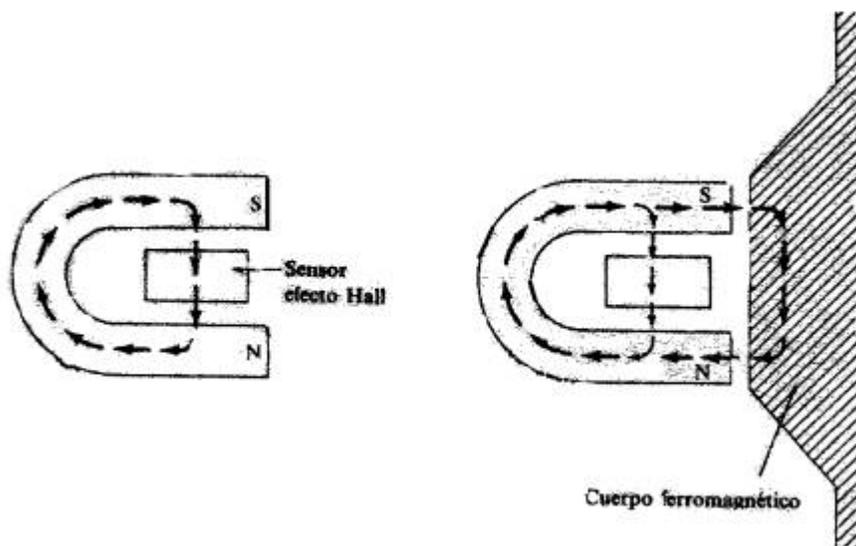


Fuente: http://www.cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/Sensor/Inductivo.

Consulta: julio de 2013.

- El sensor de efecto Hall: el efecto Hall relaciona la tensión entre dos puntos de un material conductor o semiconductor con un campo magnético a través del material, basado en el principio de la fuerza de Lorentz que actúa sobre una partícula cargada que se desplaza a través de un campo magnético. Esta fuerza actúa sobre un eje perpendicular al plano establecido por la dirección del movimiento de la partícula cargada y la dirección del campo. Si se lleva un material ferromagnético cerca del imán, disminuirá la intensidad del campo, consiguiendo disminuir la fuerza de Lorentz y la tensión a través del semiconductor.

Figura 28. **Diagrama del funcionamiento del efecto Hall**



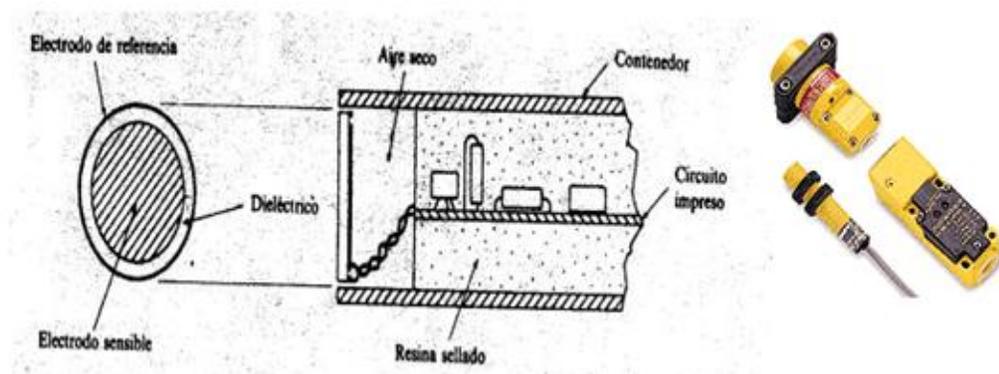
Fuente: http://www.cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/Sensor/Inductivo.

Consulta: julio de 2013.

- El sensor capacitivo: este es capaz de detectar materiales sólidos, líquidos y no ferromagnéticos. Se fundamenta en la detección de un cambio en la capacidad, inducido por una superficie que se lleva cerca del elemento sensor, constituido por un condensador, un electrodo

sensible y otro de referencia que pueden ser un disco y un anillo metálicos separados por un material dieléctrico. El resto del sensor está constituido por circuitos electrónicos embebidos en una resina para soporte mecánico y sellado, utilizando métodos para la detección de la proximidad, incluyendo al condensador como parte de un circuito oscilador diseñado para que inicie sobre un valor umbral preestablecido y luego se traduzca en una tensión de salida binaria.

Figura 29. **Diagrama del funcionamiento de un sensor capacitivo**

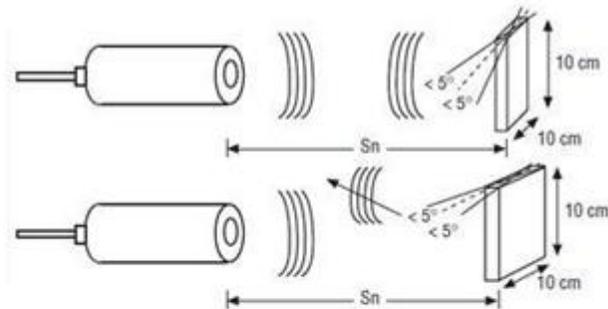


Fuente: http://www.cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/Sensor/Capacitivo.

Consulta: julio de 2013.

- El sensor ultrasónico: usa como elemento básico un transductor de electroacústica frecuentemente del tipo cerámico piezoeléctrico. Su funcionamiento se basa en vibraciones del aire de la misma naturaleza que el sonido audible, pero de una frecuencia más elevada que parte de 20 KHz hasta los 50 MHz no audible por el oído humano, alcanzando longitudes de onda que se aproximan a la luz visible. Está diseñado a modo de que se produzca un haz acústico estrecho para una eficaz transferencia de energía y una mejor direccionalidad de la señal.

Figura 30. **Diagramas del funcionamiento de un sensor ultrasónico**

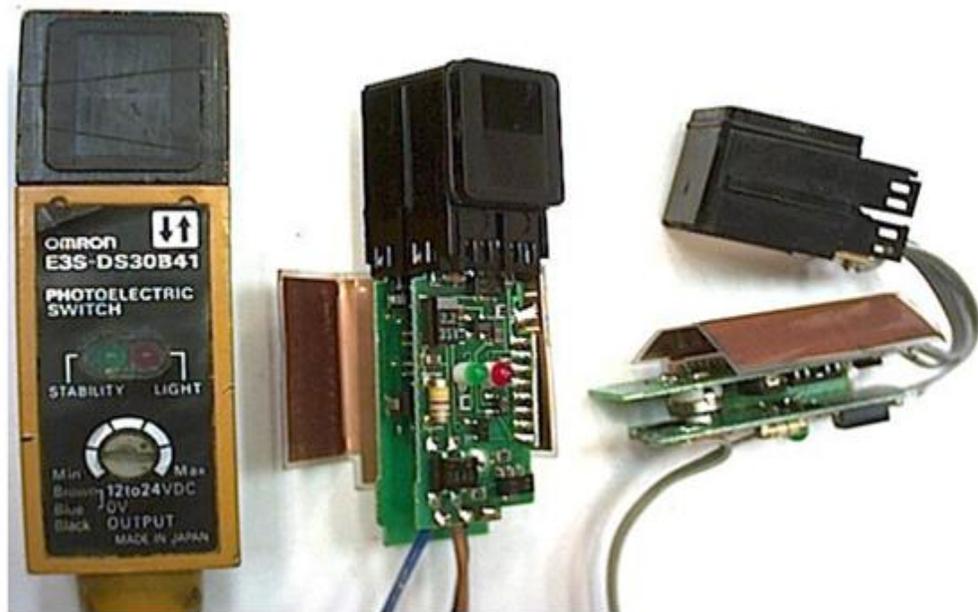


Fuente: <http://sensoresdeproximidad.blogspot.com/p/ultrasonico.html>.

Consulta: julio de 2013.

- El sensor de proximidad óptico: es similar en funcionamiento al sensor ultrasónico en el sentido de que detecta la proximidad de un objeto por su influencia sobre una onda propagadora de luz que se desplaza desde un transmisor hasta un receptor. Está constituido por un diodo emisor de luz de estado sólido (LED), que actúa como un transmisor de luz infrarroja y un fotodiodo de estado sólido que actúa como el receptor. Los sensores utilizados en la industria son de la marca OMRON en sus diferentes formas, tamaños y aplicaciones en detección de objetos que se transportan por bandas transportadoras, etc. En la siguiente figura se ilustra este tipo de sensor óptico.

Figura 31. Diagrama de un sensor óptico marca OMRON



Fuente: <http://heli.xbot.es/sensores/sensores.htm>. Consulta: julio de 2013.

2.1.5.2.3. El sensor detección de contacto

El sensor de contacto se utiliza para obtener información asociada con el contacto entre un robot y un objeto en el espacio de trabajo. Puede utilizarse para la localización y el reconocimiento del objeto, así como para controlar la fuerza ejercida por un manipulador sobre un objeto dado. Pueden subdividirse en dos categorías principales.

- Sensores binarios: se usan para determinar si una pieza está presente o no. De manera análoga a los seres humanos, estos sienten cuando se desplazan a través de un recinto completamente oscuro. Son dispositivos de contacto tales como los interruptores, microinterruptores, etc.

- Sensores analógicos: tienen la característica de una salida que es proporcional a una fuerza local. El más simple de estos dispositivos está constituido por una varilla accionada por resorte que está mecánicamente enlazada con un eje giratorio, de tal manera que el desplazamiento de la varilla, debido a una fuerza lateral, da lugar a una rotación proporcional del eje. La rotación se mide luego de manera continua utilizando un potenciómetro, o de forma digital, con el uso de una rueda de código. El crecimiento de la constante del resorte proporciona la fuerza que corresponde a un desplazamiento dado.

Por lo general se usan matrices de detección utilizando sensores individuales múltiples, los cuales consisten en una matriz de electrodos en contacto eléctrico con un material conductor dúctil (sustancias basadas en grafito) cuya resistencia varía como una función de la compresión. A estos dispositivos también se les suele denominar pieles artificiales, los cuales, cuando un objeto los presiona contra la superficie, producen deformaciones locales que se miden como variaciones continuas de la resistencia. Estas últimas se transforman con facilidad en señales eléctricas, cuya amplitud es proporcional a la fuerza que se aplica en cualquier punto dado sobre la superficie del material.

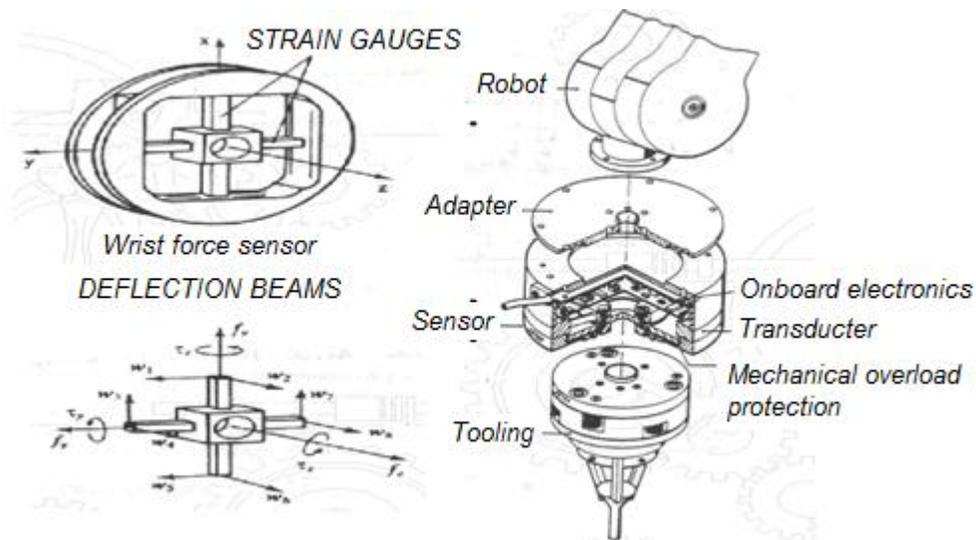
2.1.5.2.4. Los sensores de detección y torsión

El dispositivo se utiliza principalmente para medir las fuerzas de reacción desarrolladas en la superficie de separación entre conjuntos mecánicos, como una articulación y la muñeca de un brazo robot.

La mayoría de estos sensores se utilizan por ejemplo en la muñeca de un robot como transductores para transformar las fuerzas y los pares ejercidos en desviaciones o desplazamientos medibles cumpliendo con las características de alta rigidez, diseño compacto, linealidad, baja histéresis y rozamiento interno entre otras.

En la siguiente figura se muestra un sensor con ocho pares de galgas de deformaciones de semiconductores, montadas en cuatro barras de deflexión (una galga a cada lado de una barra de deflexión); las galgas en los extremos abiertos opuestos de las barras de deflexión están cableadas de manera diferencial a un circuito potenciométrico, cuya tensión de salida es proporcional a la componente de la fuerza, normal al plano de la galga de deformación.

Figura 32. **Diagrama de un sensor de fuerza y torsión con galgas de deformación y un brazo con este sensor**



Fuentes: http://www.cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/Sensor/Fuerza

http://www.cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/Sensor/Brazo.

Consulta: julio de 2013.

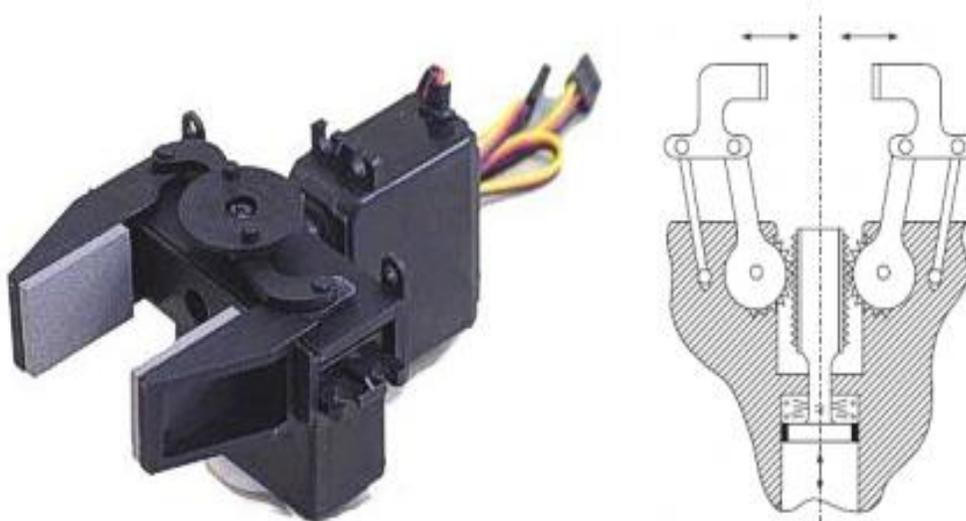
2.1.6. Los efectores

El efector es el dispositivo final de un robot que afecta o modifica al medio y bajo el control del robot. Análogamente, los efectores en un ser humano son las piernas, brazos y los dedos.

Dentro de este contexto, los elementos terminales de sujeción tienen la misión de agarrar y sostener los objetos para su transporte. Algunos de los dispositivos de agarre que se encuentran son los mecánicos, ventosas, adhesivos y ganchos.

En cada efector se debe tomar en cuenta el peso, forma, tamaño del objeto, fuerza necesaria, peso del terminal (para diversas posiciones del elemento), necesidad de sensores (para controlar el estado del objeto).

Figura 33. Efector de un brazo robótico



Fuente: <http://creandoelfuturo.net/es/robotica/morfologia-del-robot>.

Consulta: julio de 2013.

3. CINEMÁTICA Y DINÁMICA DE UN ROBOT

3.1. Fundamentos sobre localización espacial

La manipulación de piezas de ciertos robots implica el movimiento espacial de este mismo, conociendo la información del entorno como la posición y orientación, respecto de un punto de referencia, requiriendo de variables para que el robot pueda procesar y reaccionar ante determinada acción que se presente. Por ello es conveniente analizar cuantitativamente estas variables para modelar matemáticamente el proceso de acción del robot y así pueda actuar dinámicamente.

3.1.1. Representación de la posición

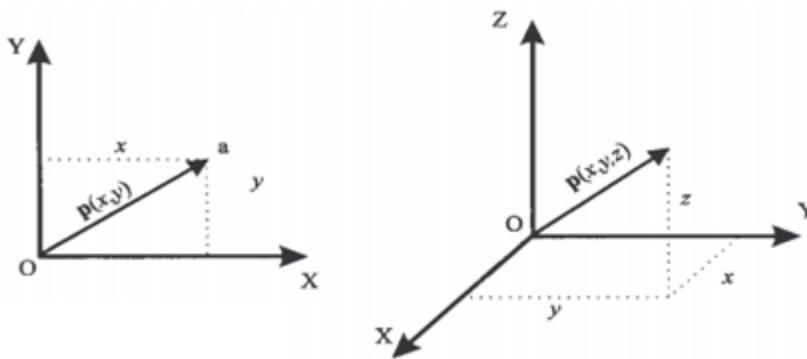
Para la localización de un cuerpo rígido en el espacio es necesario contar con una herramienta que permita localizar sus puntos en el plano espacial. Una de las formas intuitivas y utilizadas para especificar la posición de un punto es usando generalmente el sistema de coordenadas cartesianas, así como también las coordenadas polares para dos dimensiones y las cilíndricas y esféricas para espacios de tres dimensiones.

3.1.1.1. El sistema de coordenadas cartesianas

El sistema cartesiano se define como un sistema de referencia mediante ejes perpendiculares entre sí con un origen definido para dos dimensiones como OXY, correspondiente para dos vectores coordenados OX y OY perpendiculares entre sí con un punto de intersección común O y para tres

dimensiones como OXYZ para los vectores coordenados OX, OY y OZ, de igual forma, perpendiculares entre sí.

Figura 34. **Representación de ejes coordenados para dos y tres dimensiones**



Fuente: BARRIENTOS, Antonio. *Fundamentos de robótica*. p. 58.

Si se trabaja en un plano con su sistema coordenado OXY de referencia asociado, un punto A vendrá expresado por las componentes (x, y) correspondientes a los ejes coordenados del sistema OXY. Este punto tiene asociado un vector $p(x, y)$, que va desde el origen O del sistema OXY hasta el punto A. Por tanto, la posición del extremo del vector $p(x, y)$ está caracterizado por las dos componentes (x, y) , denominadas coordenadas cartesianas del vector y que son proyecciones del vector $p(x, y)$ sobre los ejes OX y OY.

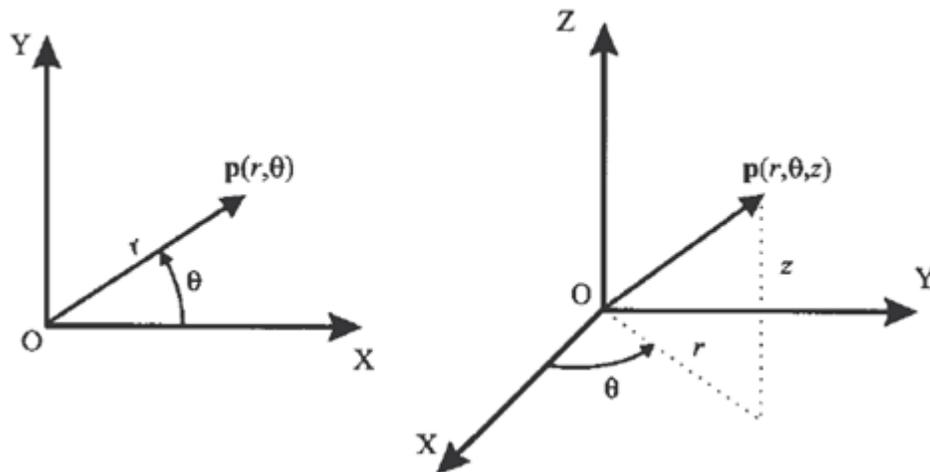
3.1.1.2. Sistema de coordenadas polares y cilíndricas

En la caracterización de la localización de un punto o vector $p(x, y)$, respecto de un sistema de ejes cartesianos de referencia OXY utilizando las denominadas coordenadas polares $p(r, \theta)$, la r representa la distancia desde el

origen O del sistema hasta el extremo del vector p , mientras que θ es el ángulo que forma el vector p con el eje OX.

En el caso de trabajar en tres dimensiones, un vector p podrá expresarse respecto de un sistema de referencia OXYZ, mediante las coordenadas cilíndricas $p(r, \theta, z)$, en donde z expresa la proyección sobre el eje OZ del vector p .

Figura 35. **Representación de coordenadas polares y cilíndricas**



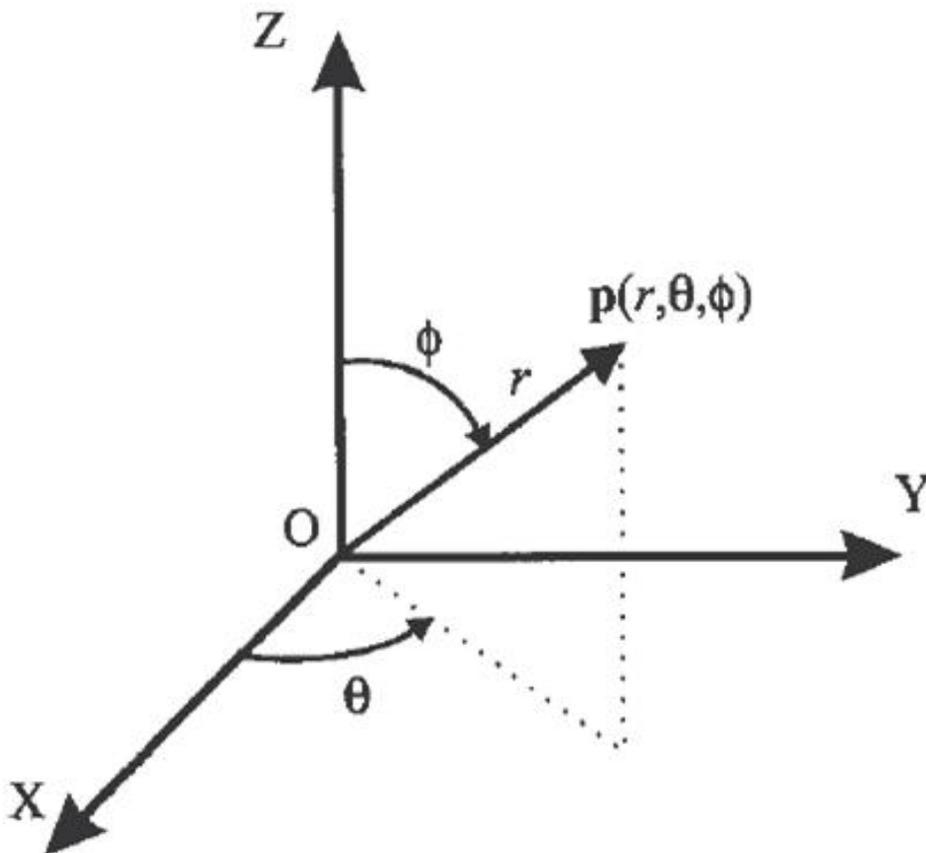
Fuente: BARRIENTOS, Antonio. *Fundamentos de robótica*. p. 59.

3.1.1.3. El sistema de coordenadas esféricas

El sistema de coordenadas esféricas se usan para realizar la localización de un vector en un espacio de tres dimensiones, utilizando el sistema de referencia OXYZ; el vector p tendrá como coordenadas esféricas (r, θ, ϕ) , donde la componente r es la distancia desde el origen O hasta el extremo del vector p .

La componente θ es el ángulo formado por la proyección del vector p sobre el plano OXY con el eje OX y la componente ϕ es el ángulo formado por el vector p con el eje OZ .

Figura 36. **Representación de coordenadas esféricas**



Fuente: BARRIENTOS, Antonio. *Fundamentos de robótica*. p. 60.

En el caso de trabajar con tres dimensiones, un vector p podrá expresarse respecto de un sistema de referencia $OXYZ$, mediante las coordenadas cilíndricas $p(r, \theta, z)$, en donde z expresa la proyección sobre el eje OZ del vector p .

3.1.2. Representación de la orientación

En el espacio queda un punto totalmente definido a través de los datos de su posición. Sin embargo, para el caso de un sólido, es necesario además definir cuál es su orientación respecto de un sistema de referencia.

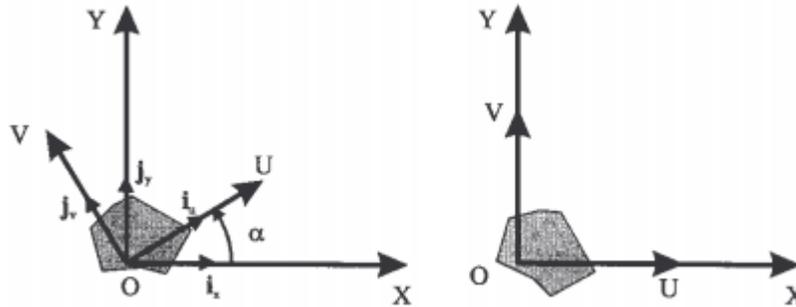
La orientación en el espacio tridimensional viene definida por tres grados de libertad o tres componentes linealmente independientes. Para poder describir de forma sencilla la orientación de un objeto respecto de un sistema de referencia, es habitual asignar solidariamente al objeto un nuevo sistema, y después estudiar la relación espacial existente entre los dos sistemas. Esta relación vendrá dada por la posición y orientación del sistema asociado al objeto respecto al de referencia, y sus dos métodos analíticos que son las matrices de rotación y los ángulos de Euler.

3.1.2.1. La matriz de rotación

El método hace uso del álgebra matricial indicando un sistema bidimensional que tiene dos sistemas de referencia OXY y OUV, en el cual el sistema OXY (referencia fijo) y el sistema OUV (móvil al objeto) en donde se tienen los vectores unitarios (i_x, j_y) de los ejes coordenados del sistema OXY y los vectores unitarios (i_u, j_v) del sistema OUV, respectivamente, representados mediante un vector p en el plano de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{xy} &= [p_x, p_y]^T = p_x \cdot \mathbf{i}_x + p_y \cdot \mathbf{j}_y \\ \mathbf{p}_{uv} &= [p_u, p_v]^T = p_u \cdot \mathbf{i}_u + p_v \cdot \mathbf{j}_v \end{aligned}$$

Figura 37. **Representación de la orientación de un sistema OUV respecto a otro sistema OXY en un plano**



Fuente: BARRIENTOS, Antonio. *Fundamentos de robótica*. p. 61.

De la anterior figura se puede representar a los sistemas mediante la siguiente equivalencia:

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} p_u \\ p_v \end{bmatrix} \quad \text{CON} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} i_x i_u & i_x j_v \\ j_y i_u & j_y j_v \end{bmatrix}$$

De donde R es la llamada matriz de rotación o también llamada matriz de cosenos directores, que define la orientación del sistema OUV, respecto del sistema OXY, el cual sirve para transformar las coordenadas de un vector en un sistema a las del otro. Se ha de indicar que se trata de una matriz ortonormal, tal que $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$. En el caso de dos dimensiones, la orientación viene definida por un único parámetro independiente. Si se considera la posición relativa del sistema OUV girando un ángulo α sobre el OXY, se tiene la matriz R en términos de cosenos y senos de la forma:

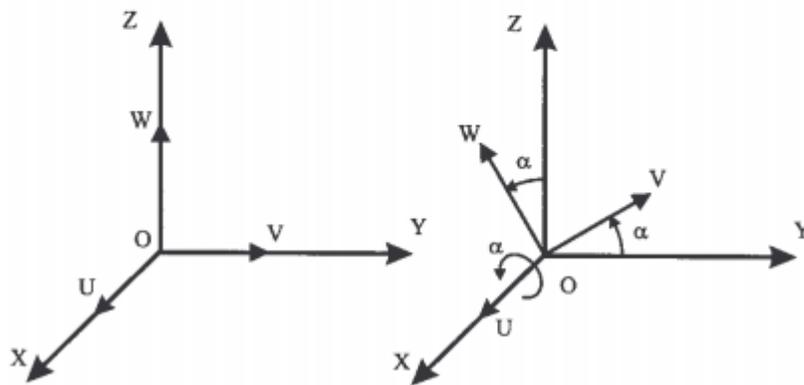
$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\text{sen}\alpha \\ \text{sen}\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

En el caso para el espacio tridimensional, el razonamiento es similar: considerando los sistemas OXYZ y OUVW, coincidentes en el origen, siendo el OXYZ el de referencia fijo y el OUVW el solidario al objeto cuya orientación se desea definir, los vectores unitarios del sistema OXYZ serán (i_x, j_y, k_z) , mientras que los del OUVW (i_u, j_v, k_w) . Un vector p del espacio podrá ser referido a cualquiera de los sistemas de la manera que a continuación se presenta:

Figura 38. **Representación de la orientación de un sistema OUVW respecto de otro OXYZ, en un plano tridimensional**

$$\mathbf{p}_{uvw} = [p_u, p_v, p_w]^T = p_u \cdot \mathbf{i}_u + p_v \cdot \mathbf{j}_v + p_w \cdot \mathbf{k}_w$$

$$\mathbf{p}_{xyz} = [p_x, p_y, p_z]^T = p_x \cdot \mathbf{i}_x + p_y \cdot \mathbf{j}_y + p_z \cdot \mathbf{k}_z$$



Fuente: BARRIENTOS, Antonio. *Fundamentos de robótica*. p. 63.

De la anterior figura se puede representar a los sistemas mediante la siguiente equivalencia:

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} p_u \\ p_v \\ p_w \end{bmatrix} \quad \text{con} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} i_x i_u & i_x j_v & i_x k_w \\ j_y i_u & j_y j_v & j_y k_w \\ k_z i_u & k_z j_v & k_z k_w \end{bmatrix}$$

La principal utilidad de esta matriz de rotación corresponde a la representación de la orientación de sistemas girados únicamente sobre uno de los ejes principales del sistema de referencia. La orientación del sistema OUVW, con el OU coincidente con el eje OX vendrá representada mediante la matriz:

$$\mathbf{R}(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\operatorname{sen} \alpha \\ 0 & \operatorname{sen} \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

La orientación del sistema OUVW, con el OV coincidente con el eje OY vendrá representada mediante la matriz:

$$\mathbf{R}(y, \phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \operatorname{sen} \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\operatorname{sen} \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix}$$

Por último, la orientación del sistema OUVW, con el OW coincidente con el eje OZ vendrá representada mediante la matriz:

$$\mathbf{R}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\operatorname{sen} \theta & 0 \\ \operatorname{sen} \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La aplicación se expresa de manera continua en varias rotaciones. Así, si al sistema OUVW se le aplica una rotación de ángulo α sobre OX, seguida de una rotación de ángulo ϕ sobre OY y de una rotación de ángulo θ sobre OZ se obtiene una expresión de senos y cosenos.

$$\mathbf{T} = \mathbf{R}(z, \theta) \mathbf{R}(y, \phi) \mathbf{R}(x, \alpha) = \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\phi & 0 & S\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\phi & 0 & C\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha & -S\alpha \\ 0 & S\alpha & C\alpha \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{R}(z, \theta) \mathbf{R}(y, \phi) \mathbf{R}(x, \alpha) = \begin{bmatrix} C\theta C\phi & -S\theta C\alpha + C\theta S\phi S\alpha & S\theta S\alpha + C\theta S\phi C\alpha \\ S\theta C\phi & C\theta C\alpha + S\theta S\phi S\alpha & -C\theta S\alpha + S\theta S\phi C\alpha \\ -S\phi & C\phi S\alpha & C\phi C\alpha \end{bmatrix}$$

De donde $C\theta$ expresa $\cos\theta$ y $S\theta$ expresa $\sin\theta$, tomando en cuenta que el orden en que se realizan las rotaciones y el producto de las matrices no es conmutativo.

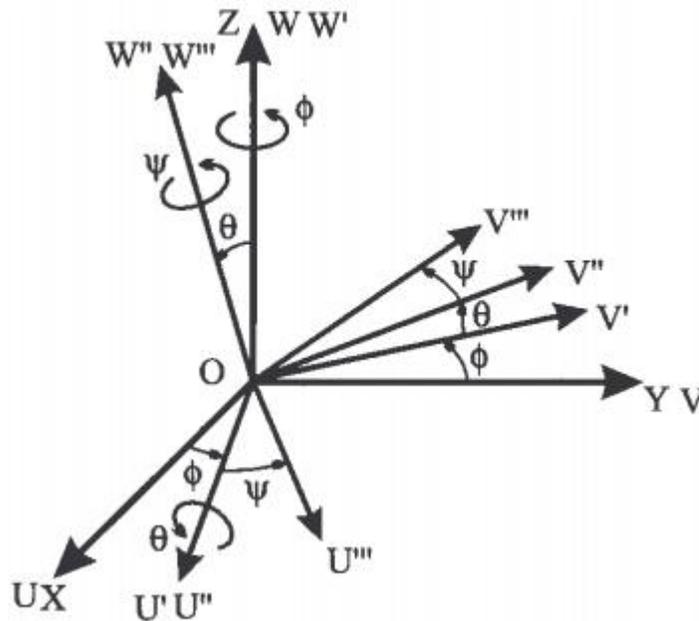
3.1.2.2. Los ángulos de Euler

En un sistema OUVW como solidario al cuerpo cuya orientación respecto de un sistema de referencia OXYZ se pueden definir tres ángulos denominados ángulos de Euler los cuales son: ϕ , θ , γ .

El giro de manera continua del sistema OXYZ sobre ejes determinados de un triedro ortonormal con los valores de ϕ , θ , γ dará como resultado el sistema OUVW.

Se necesita conocer los ángulos y cuáles son los ejes sobre los que se realizan los giros. Existen diversas posibilidades, siendo las tres más usuales las que se muestran a continuación.

Figura 39. **Representación de la orientación de un sistema OUVW respecto de otro OXYZ, en un plano tridimensional**



Fuente: BARRIENTOS, Antonio. *Fundamentos de robótica*. p. 66.

3.1.3. Coordenadas y matrices de transformación homogénea

La matriz de transformación homogénea relaciona la posición y orientación de un sólido en el espacio de manera conjunta.

Un espacio N-dimensional se encuentra representado en coordenadas homogéneas por (N+1) dimensiones, de tal forma que un vector $p(x, y, z)$ vendrá representado por $p(w_x, w_y, w_z, w)$, donde w tiene un valor arbitrario y representa un factor de escala.

De forma general, un vector $p = ai + bj + ck$, donde i, j y k son los vectores unitarios de los ejes OX, OY y OZ del sistema de referencia $OXYZ$, se representa en coordenadas homogéneas mediante el vector columna:

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aw \\ bw \\ cw \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ 1 \end{bmatrix}$$

Se define una matriz de transformación homogénea T a una matriz de dimensión 4×4 , que representa la transformación de un vector de coordenadas homogéneas de un sistema de coordenadas a otro.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{p}_{3 \times 1} \\ \mathbf{f}_{1 \times 3} & \mathbf{w}_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{bmatrix}$$

De la anterior definición se observa que una matriz homogénea está compuesta por cuatro submatrices de distinto tamaño: una submatriz $R_{3 \times 3}$ que corresponde a una matriz de rotación, una submatriz $P_{3 \times 1}$ que corresponde al vector de traslación, una submatriz $f_{1 \times 3}$ que representa una transformación de perspectiva, y una submatriz $W_{1 \times 1}$ que representa un escalado global. En general solo interesa conocer el valor de $R_{3 \times 3}$ y de $P_{3 \times 1}$, considerándose las componentes de $f_{1 \times 3}$ nulas y la de $W_{1 \times 1}$ la unidad.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{p}_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La anterior matriz representa la orientación y posición de un sistema O'UVW rotado y trasladado respecto del sistema de referencia OXYZ.

Esta matriz sirve para conocer las coordenadas (r_x, r_y, r_z) del vector r en el sistema OXYZ a partir de sus coordenadas (r_u, r_v, r_w) en el sistema O'UVW.

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} r_u \\ r_v \\ r_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

Se dice que una matriz de transformación homogénea se puede aplicar para:

- Representar la posición y orientación de un sistema girado y trasladado O'UVW respecto de un sistema fijo de referencia OXYZ, que es lo mismo que representar una rotación y traslación realizada sobre un sistema de referencia.
- Transformar un vector expresado en coordenadas respecto de un sistema O'UVW, a su expresión en coordenadas del sistema de referencia OXYZ.
- Rotar y trasladar un vector respecto de un sistema de referencia fijo OXYZ.

3.1.3.1. Coordenada de traslación

Se define la matriz de traslación $T(p)$ tomando en cuenta un sistema $O'UVW$; se traslada un vector $P = P_x i, P_y j, P_z k$ respecto de un sistema de referencia fijo $OXYZ$, mediante la siguiente expresión:

$$T(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Se puede decir que un vector cualquiera r , representado en el sistema $O'UVW$ por r_{uvw} , obtendrá las componentes del vector respecto del sistema $OXYZ$ mediante la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_u \\ r_v \\ r_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_u + p_x \\ r_v + p_y \\ r_w + p_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Por otro lado, un vector $r_{x,y,z}$ desplazado sobre un sistema de referencia fijo, tendrá una matriz T como componentes $r'_{x,y,z}$ de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} r'_x \\ r'_y \\ r'_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_x + p_x \\ r_y + p_y \\ r_z + p_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

3.1.3.2. Coordenada de rotación

El análisis ahora se hace con un sistema O'UVW que se encuentra rotado respecto del sistema OXYZ. La submatriz de rotación $R_{3 \times 3}$ será la que defina la rotación. De esta forma se pueden delimitar tres matrices homogéneas básicas de rotación respecto de cada uno de los tres ejes coordenados OX, OY y OZ del sistema de referencia OXYZ, de la siguiente manera:

$$\mathbf{T}(\mathbf{x}, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{T}(\mathbf{y}, \phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}(\mathbf{z}, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En este caso se puede decir que un vector cualquiera r , representado en el sistema girado O'UVW por $r_{u,v,w}$, tendrá como componentes (r_x, r_y, r_z) en el sistema OXYZ de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} r_u \\ r_v \\ r_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

A su vez un vector $r_{x,y,z}$ rotado según T vendrá expresado por $r'_{x,y,z}$ de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} r'_x \\ r'_y \\ r'_z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

La traslación y la rotación son transformaciones que se realizan en relación con un sistema de referencia. Por lo tanto, si se quiere expresar la posición y orientación de un sistema O'UVW coincidente con el de referencia, que ha sido rotado y trasladado, habrá que tener en cuenta si se ha realizado la rotación y después la traslación o viceversa; pues las matrices homogéneas no son conmutativas.

3.1.3.3. Coordenada de rotación - traslación

El análisis se hace primero rotando un sólido del sistema sobre uno de los ejes coordenados del sistema OXYZ seguida de una traslación hacia otro sistema, expresando las matrices homogéneas de la siguiente manera:

- Rotación de un ángulo α sobre el eje OX seguido de una traslación de vector $P_{x,y,z}$:

$$\mathbf{T}((\mathbf{x}, \alpha), \mathbf{p}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & p_y \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Rotación de un ángulo ϕ sobre el eje OY seguido de una traslación de vector $P_{x,y,z}$:

$$\mathbf{T}((y, \phi), \mathbf{p}) = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \text{sen}\phi & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ -\text{sen}\phi & 0 & \cos\phi & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Rotación de un ángulo θ sobre el eje OZ seguido de una traslación de vector $P_{x,y,z}$:

$$\mathbf{T}((z, \theta), \mathbf{p}) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 & p_x \\ \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.1.3.4. Coordenada de traslación – rotación

En este análisis se hace una traslación seguida de una rotación sobre los ejes coordenados del sistema OXYZ, definiendo las matrices homogéneas.

- Traslación de vector $P_{x,y,z}$ seguida de rotación de un ángulo α sobre el eje OX:

$$\mathbf{T}(\mathbf{p}, (x, \alpha)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & \cos\alpha & -\text{sen}\alpha & p_y \cos\alpha - p_z \text{sen}\alpha \\ 0 & \text{sen}\alpha & \cos\alpha & p_y \text{sen}\alpha + p_z \cos\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Traslación de vector $P_{x,y,z}$ seguida de rotación de un ángulo ϕ sobre el eje OY:

$$\mathbf{T}(\mathbf{p}, (\mathbf{y}, \phi)) = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \text{sen}\phi & p_x \cos\phi + p_z \text{sen}\phi \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ -\text{sen}\phi & 0 & \cos\phi & p_z \cos\phi - p_x \text{sen}\phi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Traslación de vector $P_{x,y,z}$ seguida de rotación de un ángulo θ sobre el eje OZ:

$$\mathbf{T}(\mathbf{p}, (\mathbf{z}, \theta)) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 & p_x \cos\theta - p_y \text{sen}\theta \\ \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 & p_x \text{sen}\theta + p_y \cos\theta \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.1.3.5. Composición de matrices homogéneas

La composición de matrices homogéneas tiene importancia cuando describen diversos giros y traslaciones consecutivas sobre un sistema de referencia determinado. De esta forma, una transformación compleja podrá descomponerse en la aplicación consecutiva de transformaciones simples como giros básicos y traslaciones.

Se dice que una matriz que representa un giro de un ángulo α sobre el eje OX, seguido de un giro de ángulo ϕ sobre el eje OY.

Y de un giro de ángulo θ sobre el eje OZ, puede obtenerse por la composición de las matrices básicas de rotación de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 T = T(z, \theta) T(y, \phi) T(x, \alpha) &= \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\phi & 0 & S\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S\phi & 0 & C\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha & -S\alpha & 0 \\ 0 & S\alpha & C\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} C\phi C\theta & -S\theta C\alpha + C\theta S\phi S\alpha & S\theta S\alpha + C\theta S\phi C\alpha & 0 \\ S\theta C\phi & C\theta C\alpha + S\theta S\phi S\alpha & -C\theta S\alpha + S\theta S\phi C\alpha & 0 \\ -S\phi & C\phi S\alpha & C\alpha C\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

La anterior composición del producto de matrices no es conmutativo, por lo tanto tampoco lo es la composición de transformaciones. Si se invierte el orden de aplicación de las transformaciones, el resultado es distinto.

3.2. Cinemática de un robot

La cinemática de un robot estudia el movimiento respecto de un sistema de referencia interesada por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del autómeta con los valores que toman sus coordenadas articulares. Existen dos métodos a resolver en la cinemática del autómeta que se conoce como la cinemática directa y la inversa.

El estudio de la cinemática de un robot se hace mediante análisis matemáticos de Denavit - Hartenberg y geométricos; los cuales describen y representan la geometría espacial de los elementos de una cadena cinemática respecto de un sistema de referencia fijo, utilizando una matriz de

transformación homogénea 4 x 4, que relacione la localización espacial del extremo del robot en relación con el sistema de coordenadas de su base.

3.2.1. Cinemática directa de un robot

La cinemática directa en un robot de N grados de libertad está formado por N eslabones unidos por N articulaciones, de forma que cada par de articulación - eslabón constituye un grado de libertad. A cada eslabón se le puede asociar un sistema de referencia solidario a él; utilizando transformaciones homogéneas es posible hacer la representación de las rotaciones y traslaciones relativas entre los distintos eslabones que componen un robot.

Las matrices homogéneas son el medio para el análisis y consiste en encontrar relaciones para conocer la localización espacial del extremo del robot a partir de los valores de sus coordenadas articulares. Normalmente, la matriz de transformación homogénea que representa la posición y orientación relativa entre los sistemas asociados a dos eslabones consecutivos del robot se suele denominar matriz ${}^{i-1}A_i$. En la siguiente tabla se describe la secuencia.

Tabla VII. **Secuencia de análisis para la cinemática directa**

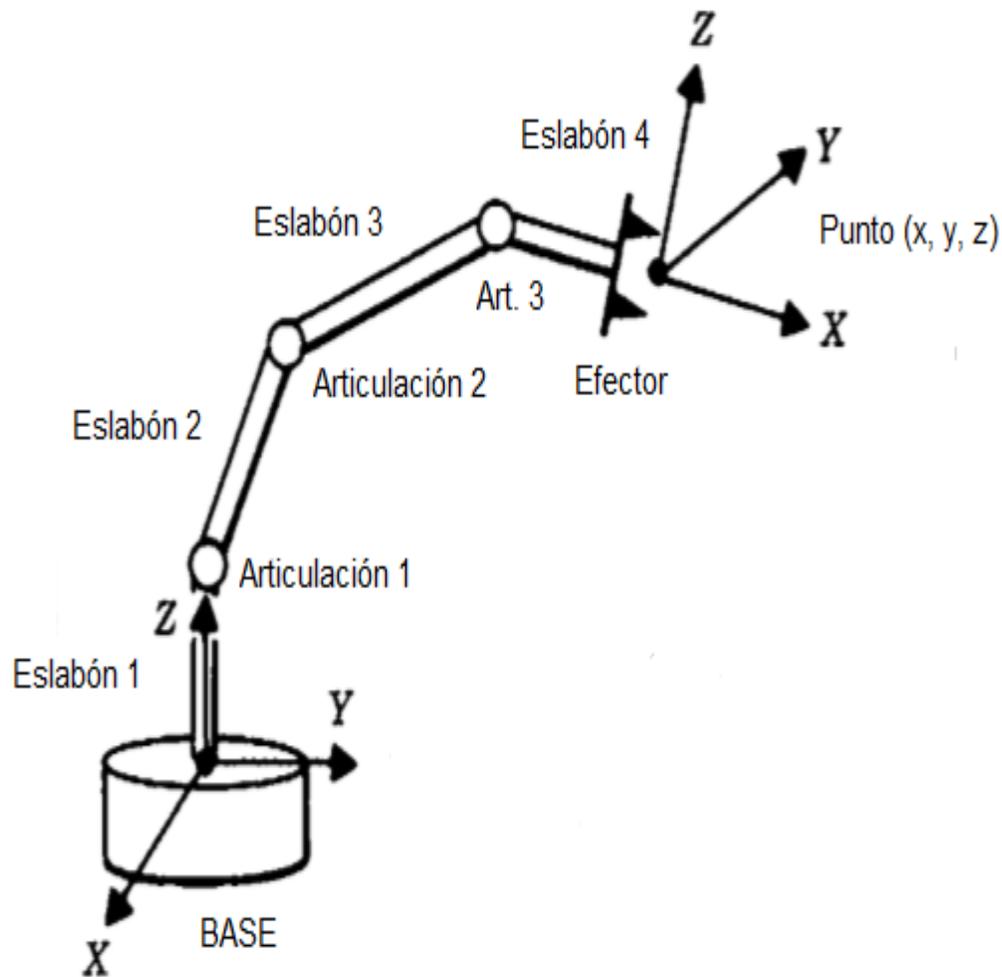
No de matriz	Descripción de la representación del proceso
0A_1	Posición y orientación del sistema de referencia solidario al primer eslabón respecto del sistema de referencia solidario a la base.
1A_2	Posición y orientación del sistema de referencia solidario al segundo eslabón respecto del primero.
2A_3	Posición y orientación del sistema de referencia solidario al tercer eslabón respecto del segundo.
3A_4	Posición y orientación del sistema de referencia solidario al cuarto eslabón respecto del segundo.

Fuente: elaboración propia.

La matriz ${}^0 A_k$ es la expresión que contiene a las matrices resultantes del producto de las matrices ${}^{i-1} A_i$ con i desde 1 hasta k y que representa de forma total o parcial la cadena cinemática que forma el robot.

En la siguiente figura se muestra un brazo robot de tres grados de libertad con sus articulaciones y coordenadas.

Figura 40. **Esquema de un robot de tres grados de libertad**



Fuente: CRAIG, John. *Introduction to robotics, mechanics and control*. p. 17.

3.2.2. Cinemática inversa de un robot

La cinemática inversa consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial, utilizando los métodos geométricos y/o las matrices de transformación homogénea para la obtención de los valores espaciales que debe adoptar las articulaciones del robot.

3.2.3. Las relaciones diferenciales

El modelado cinemático de un robot busca las relaciones entre las variables articulares, la posición y orientación del extremo de un robot con sus respectivos cambios en relación con el tiempo. Así el sistema de control del robot debe establecer qué velocidades debe imprimir a cada articulación (a través de sus respectivos actuadores) para conseguir que el extremo desarrolle una trayectoria temporal concreta. Esto se analiza mediante la denominada matriz Jacobiana.

La matriz Jacobiana directa permite conocer las velocidades del extremo del robot a partir de los valores de las velocidades de cada articulación. Por su parte, la matriz Jacobiana inversa permite conocer las velocidades articulares necesarias para obtener unas velocidades determinadas en el extremo del robot.

3.3. Dinámica de un robot

La dinámica de un robot se ocupa de la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que en él se origina. Tiene por objetivo conocer mediante representación matemática la localización del robot (variables

articulares o coordenadas de localización del extremo), velocidad, aceleración, fuerzas y pares aplicados en las articulaciones o en el extremo del robot y por último los parámetros dimensionales del robot como longitud, masas e inercias de sus elementos; así también la dinámica de sus elementos como los eslabones, sistemas de transmisión, actuadores y el equipo electrónico de mando deben de analizarse mediante los siguientes factores:

- La simulación del movimiento de un robot
- El diseño y evaluación de la estructura mecánica de un robot
- El dimensionamiento de los actuadores
- El diseño y evaluación del control dinámico de un robot

3.3.1. Modelo dinámico de una estructura mecánica de un robot

El modelo dinámico de un mecanismo y de un robot está basado fundamentalmente en el equilibrio de fuerzas de acuerdo con la segunda ley de Newton y para los movimientos de rotación en la denominada ley de Euler.

3.3.1.1. Ley de Newton

Se define como la sumatoria de fuerzas F , proporcional al producto de la masa M de un cuerpo por un cambio de velocidad $\Delta V/\Delta T$ con el tiempo sobre un plano representado mediante la siguiente expresión matemática:

$$\Sigma F = m. \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

3.3.1.2. Ley de Euler

La ley de Euler establece que la sumatoria de torques T es proporcional a la inercia del cuerpo I por el cambio de velocidad angular $\Delta W/\Delta T$ en relación con el tiempo, más el producto de la velocidad angular W y el producto cruz de la Inercia y la velocidad angular, representada mediante la siguiente expresión matemática:

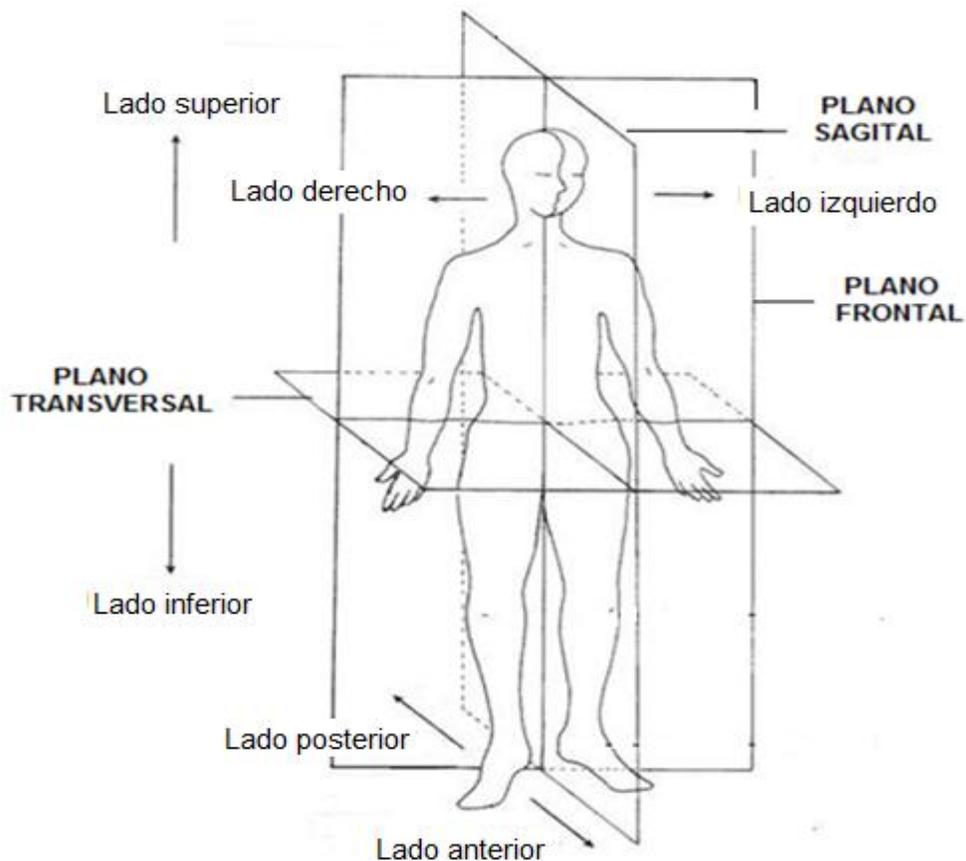
$$\Sigma T = I \cdot \frac{\Delta W}{\Delta T} + W \times I \cdot W$$

4. FUNDAMENTOS SOBRE LA MARCHA HUMANA

4.1. La planimetría del cuerpo humano

La planimetría divide en secciones al cuerpo humano por medio de tres planos fundamentales tal y como se observa en la siguiente figura:

Figura 41. Ilustración de la planimetría del cuerpo humano



Fuente: http://bibliotecabiologia.usal.es/sistema%20oseo/el_esqueleto_humano.html.

Consulta: agosto de 2013.

4.2. Movimiento de la cadera

El movimiento de la cadera tiene la función principal de orientar al individuo en todas las direcciones del espacio; para lo cual posee tres ejes y tres grados de libertad, además de dar soporte al peso corporal y la locomoción.

La cadera posee dos movimientos, de los cuales al primero se le conoce como flexión - extensión en el plano sagital, mientras que al segundo se le conoce como abducción - aducción en el plano frontal.

A continuación se describen los tipos de movimientos para la cadera de un ser humano, para comprender de mejor manera el comportamiento de la marcha humana.

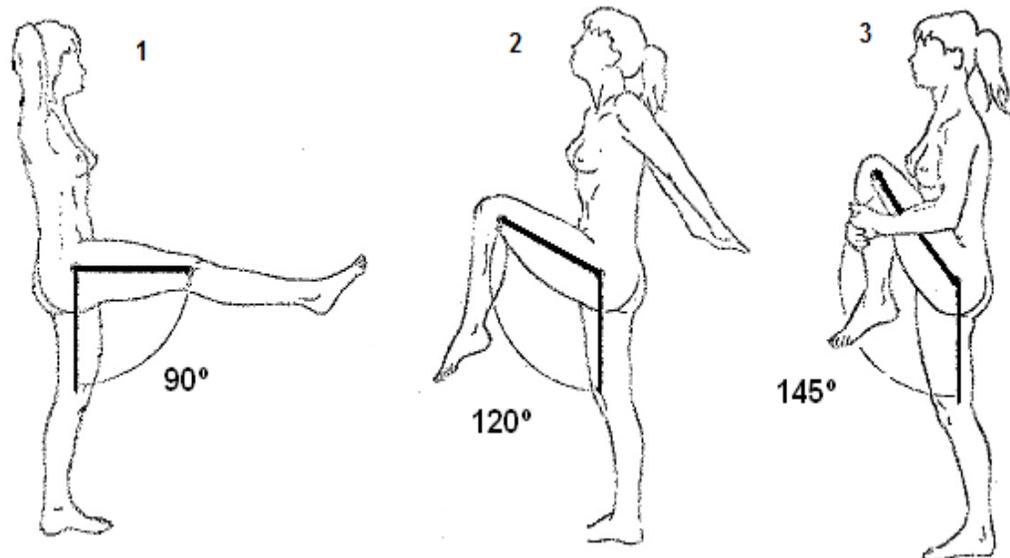
4.2.1. Movimiento de flexión

El movimiento de flexión se produce cuando alguno de los dos miembros inferiores queda delante del plano frontal de la articulación con cierto ángulo de flexión por parte de la rodilla y en relación con el plano sagital. La amplitud varía a ciertos ángulos de la siguiente manera.

- Flexión sin rodilla 90°
- Flexión con rodilla flexionada 120°
- Flexión con rodilla flexionada al cuerpo 145°

En la siguiente figura se ilustran los tres tipos de movimientos de flexión de la cadera en una persona en relación con un plano horizontal.

Figura 42. **Ilustración del movimiento de flexión de la cadera**



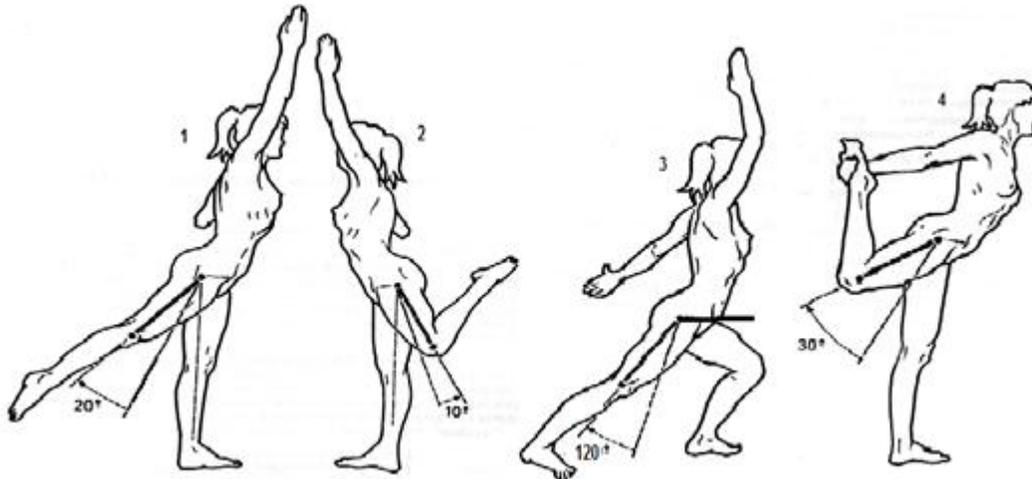
Fuente: <http://cto-am.com/cadera.htm>. Consulta: septiembre de 2013.

4.2.2. **Movimiento de extensión**

El movimiento de extensión de la cadera dirige el miembro inferior por detrás del plano frontal. La amplitud varía según distintos ángulos de la siguiente manera.

- Extensión sin rodilla flexionada 20°
- Extensión con rodilla flexionada 10°
- Extensión con rodilla opuesta flexionada 120°
- Extensión con rodilla flexionada con apoyo 30°

Figura 43. **Ilustración del movimiento de extensión de la cadera**



Fuente: <http://terapeutamasajesya.blogspot.com/2012/02/sindrome-del-piramidal-o-pisiforme.html>. Consulta: septiembre de 2013.

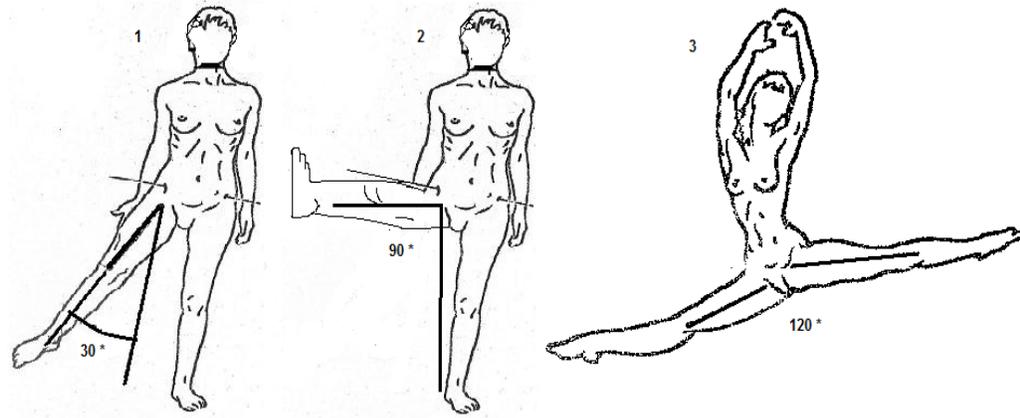
4.2.3. **Movimiento de abducción**

El movimiento de abducción dirige el miembro inferior hacia afuera del plano de simetría del cuerpo. La amplitud varía según distintos ángulos de la siguiente manera.

- Abducción normal, 30°
- Abducción respecto de la otra pierna, 90°
- Abducción entre piernas, 120°

En la siguiente figura se ilustran los tres tipos de movimientos de abducción de la cadera en una persona en relación con un plano horizontal.

Figura 44. **Ilustración del movimiento de abducción de la cadera**

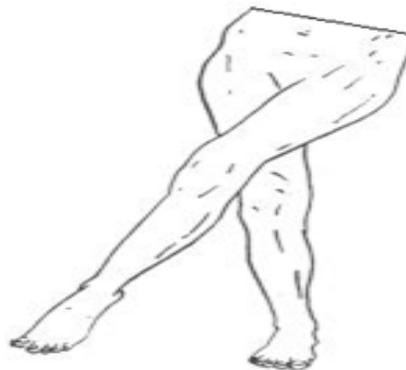


Fuente: <http://cto-am.com/cadera.htm>. Consulta: septiembre de 2013.

4.2.4. **Movimiento de aducción**

El movimiento de aducción dirige el miembro inferior hacia adentro y lo aproxima al plano de simetría del cuerpo. La amplitud varía según distintos ángulos. Dado que en esta posición ambos miembros inferiores están en contacto, no existe el movimiento de aducción pura.

Figura 45. **Ilustración del movimiento de aducción de la cadera**



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.

4.3. Movimiento de la rodilla

La rodilla es una articulación intermedia del miembro inferior y solamente posee un solo grado de libertad, teniendo por consiguiente un movimiento solamente de flexión – extensión; su función principal es regular la distancia del cuerpo respecto del suelo. Además de trabajar en compresión bajo la acción de la gravedad.

4.3.1. Movimiento de flexión - extensión

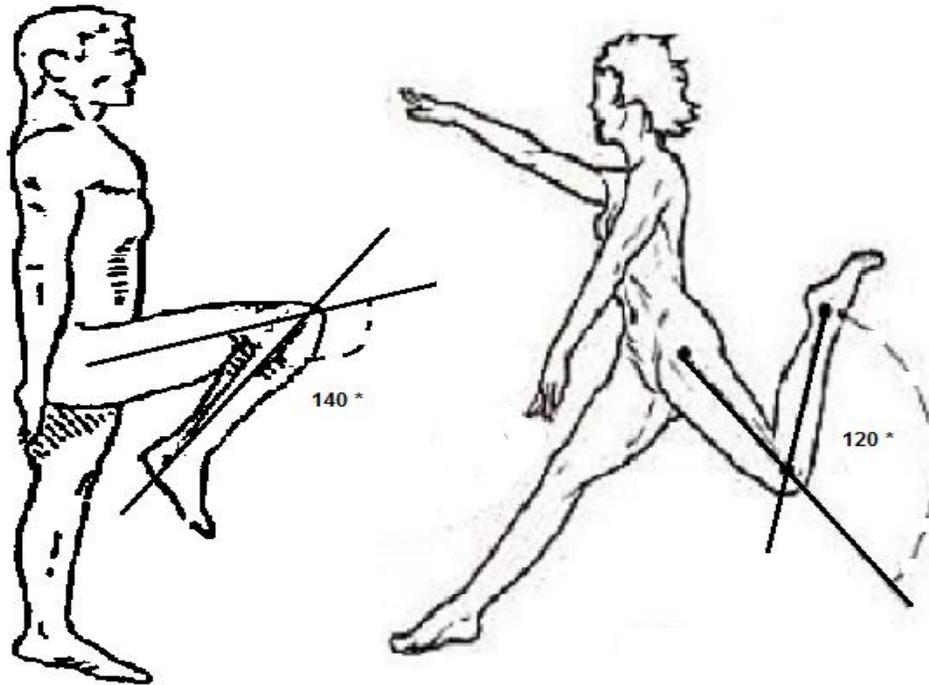
El movimiento de la rodilla se realiza en el plano sagital. El eje mecánico de la rodilla forma un ángulo de 6° con el eje del fémur. Su amplitud se mide a partir de la posición de referencia definida.

La amplitud de flexión de rodilla es distinta según la posición de la cadera y de acuerdo con las modalidades del propio movimiento. A continuación se dan valores aproximados de ángulos para la rodilla.

- La flexión activa alcanza los 140° si la cadera está previamente flexionada.
- La rodilla únicamente llega a los 120° si la cadera está en extensión.

En la siguiente figura se ilustran los movimientos de flexión – extensión que la rodilla realiza cuando una persona está en movimiento con relación al plano horizontal.

Figura 46. **Ilustración del movimiento de flexión – extensión de la rodilla**



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.

4.4. **Movimiento del tobillo**

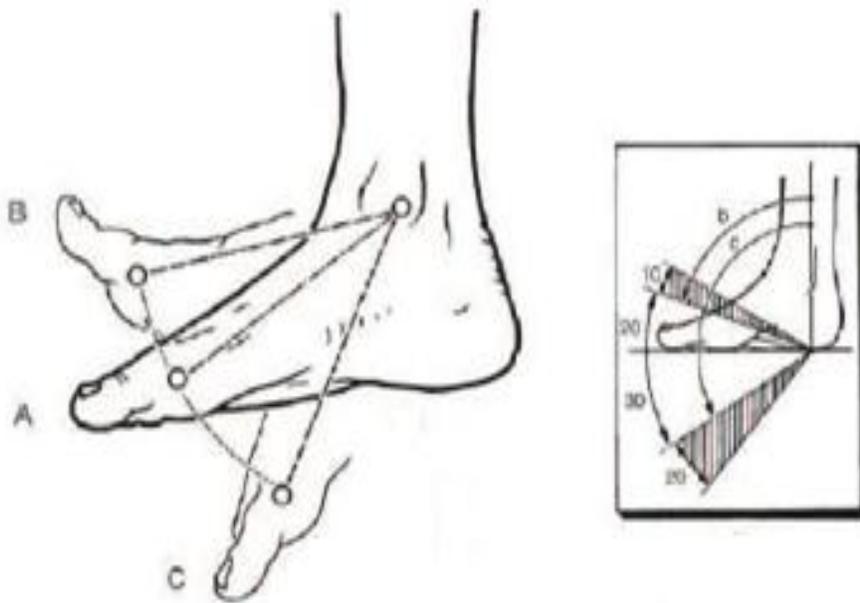
El tobillo es una articulación distal al miembro inferior condicionando los movimientos de la pierna en relación con el pie en el plano sagital. Asimismo es indispensable para la marcha humana en terreno plano y accidentado.

El tobillo es conocido también como tibiotarsiana y en conjunto con la rotación axial de la rodilla, tiene las funciones de una sola articulación de tres grados de libertad que permite orientar la bóveda plantar en todas las direcciones para que se adapte al tipo de terreno.

4.4.1. Movimiento de flexión - extensión

El movimiento de flexión - extensión se define como el que aproxima el dorso del pie a la cara anterior de la pierna. También denominada flexión dorsal o dorsiflexión. Por el contrario, la extensión de la articulación tibiotarsiana aleja el dorso del pie de la cara anterior de la pierna, mientras que el pie tiende a situarse en la prolongación de la pierna, denominado también flexión plantar.

Figura 47. Ilustración del movimiento de flexión - extensión del tobillo



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.

4.5. La biomecánica de la marcha humana

Es un proceso cíclico que consta de una serie de movimientos alternantes, rítmicos, de las extremidades y del tronco del cuerpo humano que determinan un desplazamiento hacia adelante del centro de gravedad de la persona.

4.5.1. Ciclo de la marcha

La marcha comienza cuando el pie hace contacto con el suelo y termina con el siguiente contacto del mismo pie. A la distancia entre estos dos puntos de contacto con el suelo se le llama un paso completo.

El ciclo de la marcha se divide en dos principales componentes que son la fase de apoyo y de balanceo. Una pierna está en fase de apoyo cuando hace contacto con el suelo y después en fase de balanceo cuando no está en contacto con el suelo.

4.5.1.1. Fase de apoyo

La extremidad inferior de la persona está en forma vertical y en contacto con el suelo de manera que sirva de apoyo al cuerpo para la movilidad. Esta fase constituye alrededor del 60 % del ciclo, dividida en cinco intervalos:

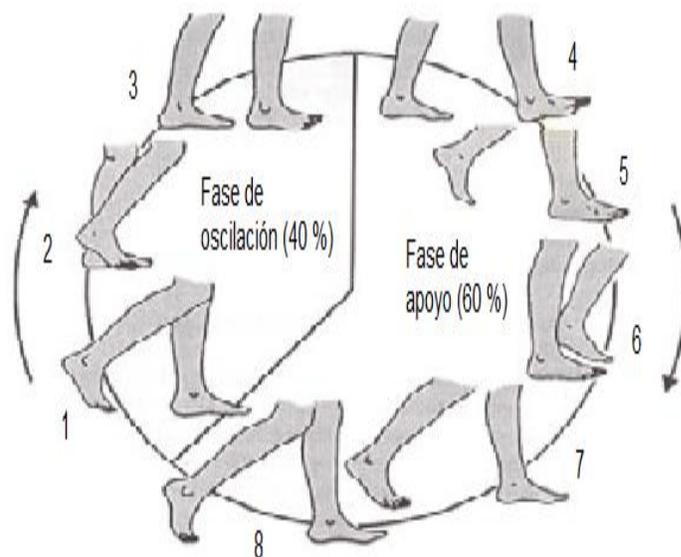
- El contacto del talón se da en el instante cuando toca el suelo.
- El apoyo plantar se da cuando el contacto de la parte anterior del pie toca el suelo.
- El apoyo medio se da en el momento en que el trocánter mayor se encuentra alineado verticalmente con el centro del pie, visto desde el plano sagital.
- La elevación del talón es el instante cuando el talón se eleva del suelo.
- El despegue del pie se da cuando los dedos se elevan del suelo.

4.5.1.2. Fase de balanceo

La fase de balanceo se realiza cuando el miembro inferior de la persona se posiciona en estado de oscilación y suspendida en el aire, con dirección de avance hacia el siguiente paso de manera pendular. Esta fase constituye el 40 por ciento del ciclo y se divide en tres intervalos:

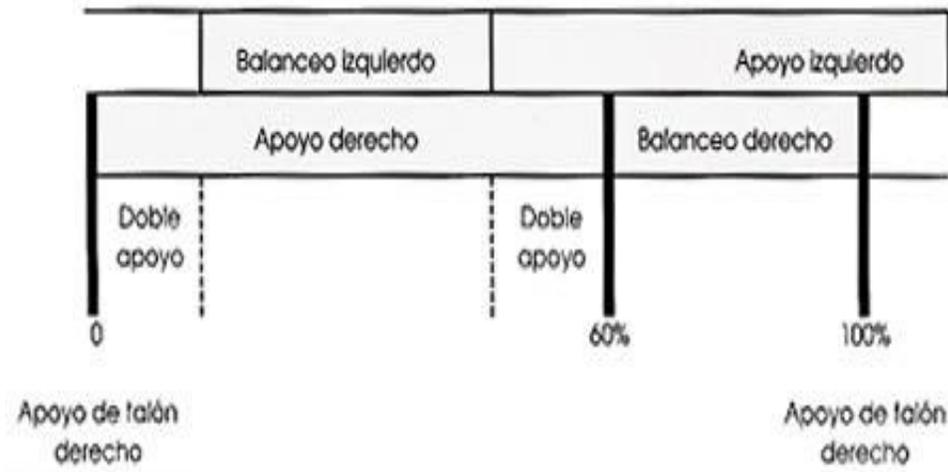
- La aceleración se caracteriza por la rápida aceleración del extremo de la pierna inmediatamente después que los dedos dejan el suelo.
- El balanceo medio se da cuando la pierna en movimiento rebasa a la pierna de apoyo como un péndulo.
- La desaceleración se da cuando la pierna desacelera al acercarse al final de intervalo.

Figura 48. **Ilustración de las fases en la marcha humana**



Fuente: <http://www.fisiofundamental.com/guia/tema9.html>. Consulta: septiembre de 2013.

Figura 49. **Esquema de las fases de la marcha humana**



Fuente: <http://www.fisiofundamental.com/guia/tema9.html>. Consulta: septiembre de 2013.

4.5.2. Los intervalos de la marcha humana en el plano sagital

El análisis de la marcha humana se describe mediante intervalos del movimiento de una persona en conjunto con los movimientos relativos de las extremidades inferiores.

Se tienen tres intervalos para la marcha humana en la cual se detallan los movimientos cinéticos de las articulaciones de la cadera, rodilla y el tobillo en relación con un plano horizontal en el ciclo de la marcha humana.

4.5.2.1. Primer intervalo

El primer intervalo de la marcha humana se realiza en el plano sagital cuando el talón hace contacto con el suelo y el punto de apoyo medio.

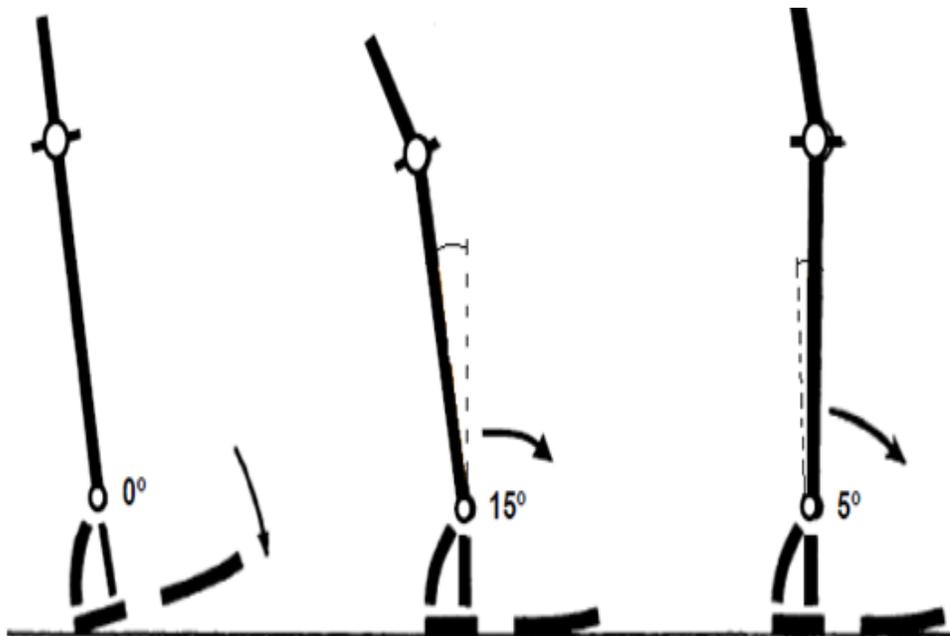
- El tobillo

Tabla VIII. Descripción del movimiento para el tobillo

Evento	Acción
Momento de contacto del talón con el suelo.	La articulación del tobillo en posición neutra (0°).
Simultáneamente con el contacto del talón.	La articulación del tobillo empieza a moverse en dirección de la flexión plantar.
Momento en que la planta del pie hace contacto con el suelo.	La articulación del tobillo se mueve 15° de la posición neutra a la flexión plantar.
En la fase media.	La articulación del tobillo pasa rápidamente a aproximadamente 5° de dorsiflexión.

Fuente: elaboración propia.

Figura 50. Ilustración del movimiento para el tobillo



Fuente: HERNÁNDEZ, Francisco. *Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana*. p. 41.

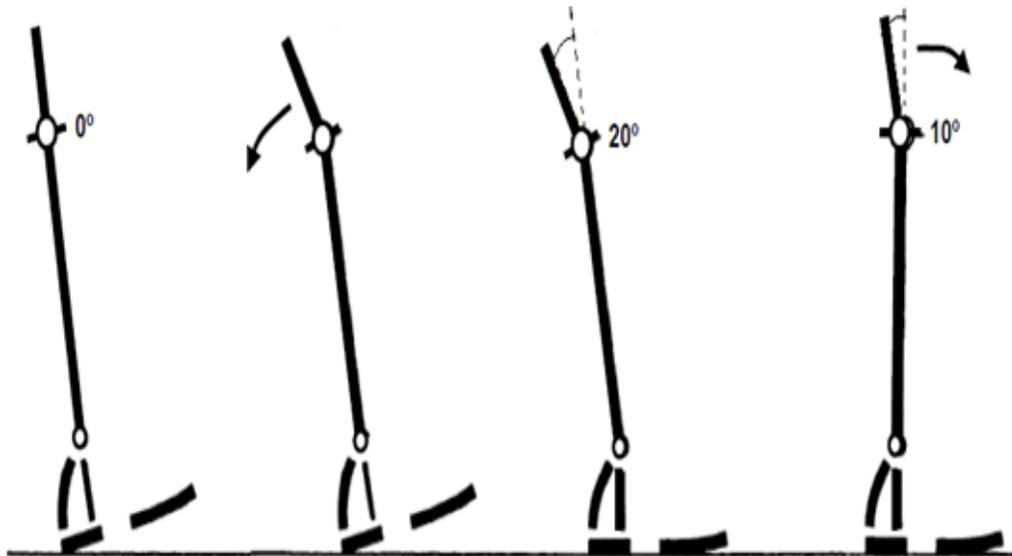
- La rodilla

Tabla IX. Descripción del movimiento para la rodilla

Evento	Acción
Inmediatamente antes del contacto del talón con el suelo.	La articulación de la rodilla se encuentra en completa extensión.
Simultáneamente con el contacto del talón con el suelo.	La articulación de la rodilla comienza a flexionarse y continúa hasta que la planta del pie esté plana en el suelo.
Inmediatamente después de haber alcanzado la posición plana del pie.	La rodilla tiene aproximadamente un ángulo de 20° de flexión y comienza a extenderse.
En la fase de apoyo medio.	La rodilla tiene aproximadamente un ángulo de 10° de flexión y continúa extendiéndose.

Fuente: elaboración propia.

Figura 51. Ilustración del movimiento para la rodilla



Fuente: HERNÁNDEZ, Francisco. *Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana*. p. 41.

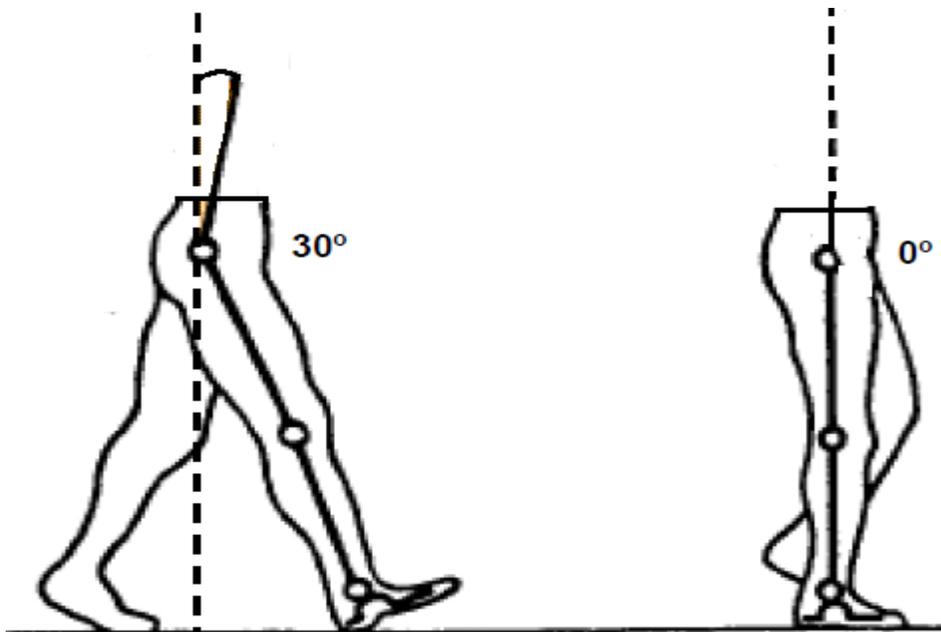
- La cadera

Tabla X. Descripción del movimiento para la cadera

Evento	Acción
Simultáneamente con el contacto del talón con el suelo.	La cadera está aproximadamente a 30° de flexión.
Inmediatamente después del contacto del talón con el suelo.	La articulación de la cadera comienza a extenderse.
En la posición del pie plano en el suelo.	El ángulo de flexión disminuye alrededor de 20°.
Entre el pie plano y el apoyo medio.	La articulación de la cadera se mueve a su posición neutral (0°).

Fuente: elaboración propia.

Figura 52. Ilustración del movimiento para la cadera



Fuente: HERNÁNDEZ, Francisco. *Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana*. p. 42.

4.5.2.2. Segundo intervalo

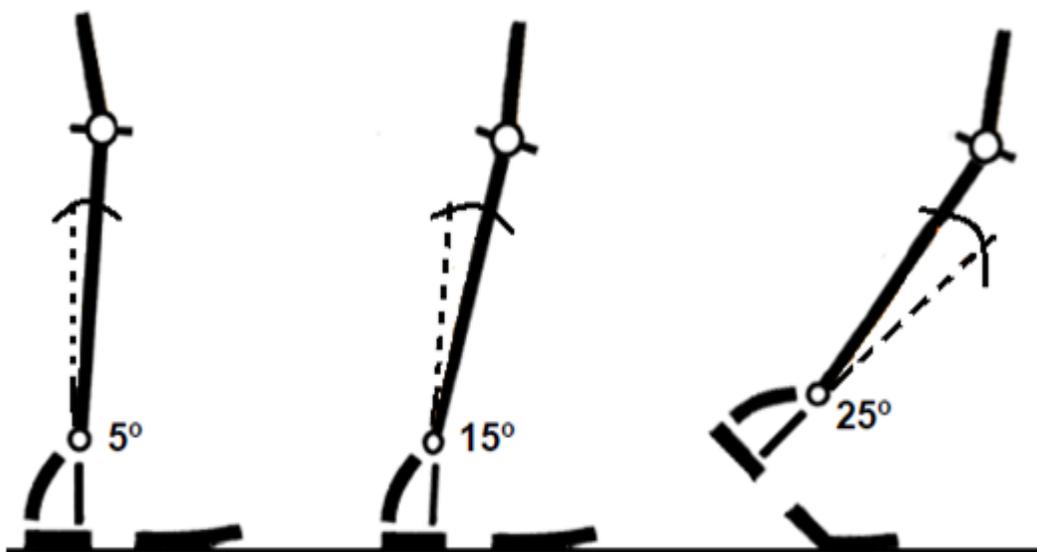
El segundo intervalo de la marcha humana se realiza en el plano sagital entre el apoyo medio y el despegue del pie con el suelo; es decir en el tobillo.

Tabla XI. Descripción del movimiento para el tobillo

Evento	Acción
En el apoyo medio	La articulación del tobillo pasa rápidamente a aproximadamente 5° de dorsiflexión.
En el momento que el talón se despegue del suelo.	La articulación del tobillo está aproximadamente a 15° de dorsiflexión.
En el intervalo de elevación del talón y el despegue del pie.	El tobillo se mueve rápidamente 35° , con lo que al despegar el pie del suelo la articulación está aproximadamente en 20° de flexión planar.

Fuente: elaboración propia.

Figura 53. Ilustración del movimiento para el tobillo



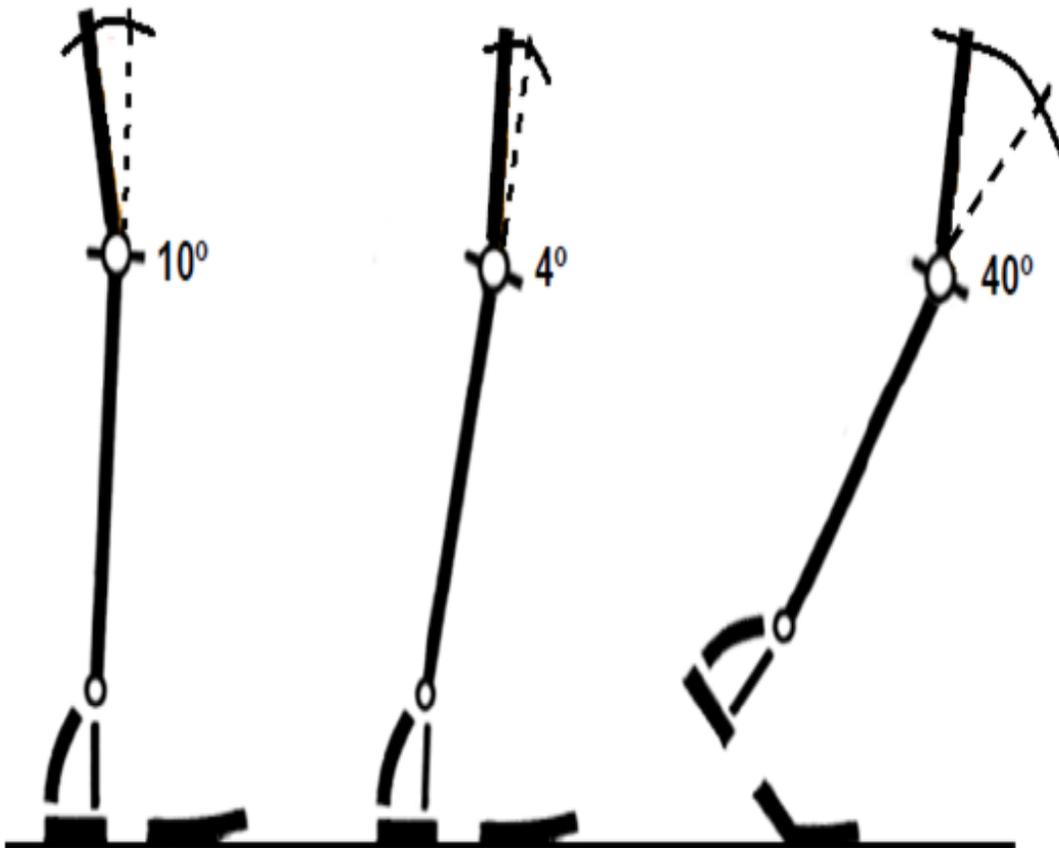
Fuente: HERNÁNDEZ, Francisco. *Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana*. p. 43.

Tabla XII. Descripción del movimiento para la rodilla

Evento	Acción
En el apoyo medio.	La rodilla tiene aproximadamente un ángulo de 10° de flexión y continúa extendiéndose.
Inmediatamente antes de que el talón pierda contacto con el suelo.	La rodilla está a 4° de la extensión completa.
Entre el despegue del talón y el de los dedos.	La articulación de la rodilla se mueve de una extensión casi completa a 40° de flexión.

Fuente: elaboración propia.

Figura 54. Ilustración del movimiento para la rodilla



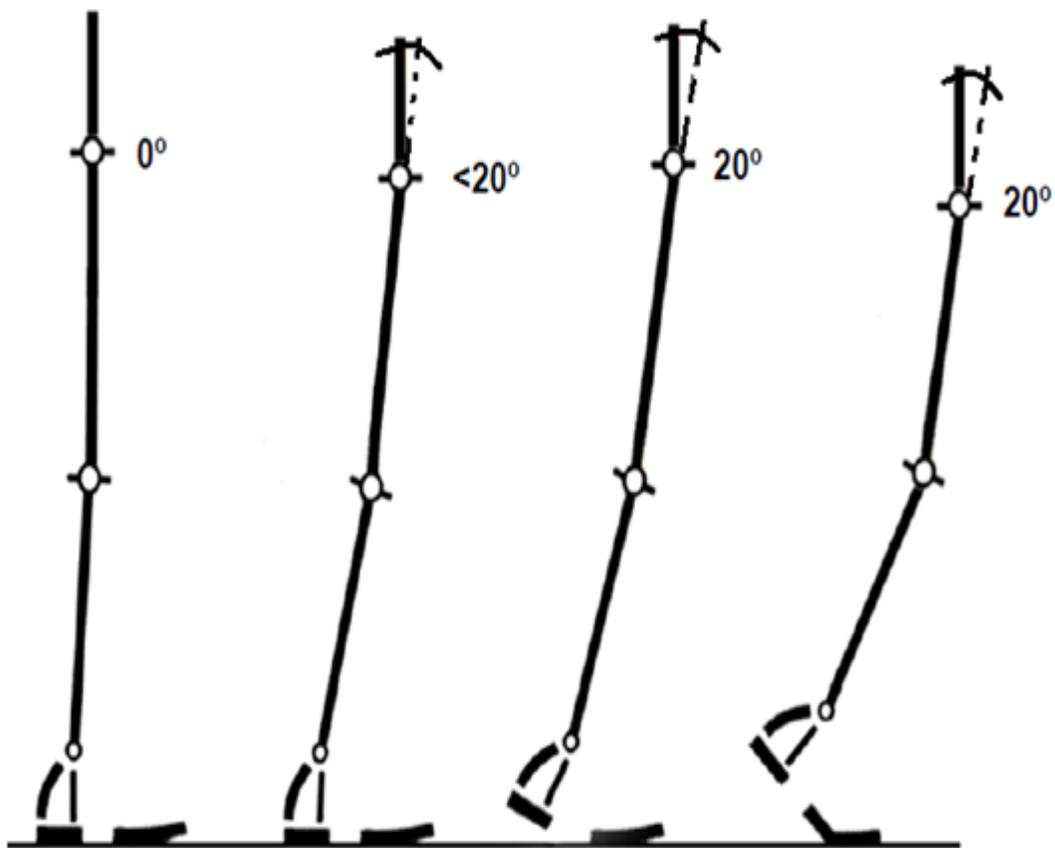
Fuente: HERNÁNDEZ, Francisco. *Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana*. p. 43.

Tabla XIII. Descripción del movimiento para la cadera

Evento	Acción
En el apoyo medio.	La articulación de la cadera se encuentra en posición neutra (0°) y comienza a moverse hacia la extensión.
Inmediatamente después del despegue del talón.	La cadera alcanza un máximo de hiperextensión de 20° .
En el momento de despegue de los dedos del suelo.	La cadera está cerca de una posición neutra y se mueve en dirección de la flexión.

Fuente: elaboración propia.

Figura 55. Ilustración del movimiento para la cadera



Fuente: HERNÁNDEZ, Francisco. *Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana*. p. 44.

4.5.2.3. Tercer intervalo

El tercer intervalo comprende los movimientos del tobillo, rodilla y cadera que se realiza en el plano sagital durante las etapas de balanceo y despegue del pie con el suelo en la marcha humana.

A continuación se explican los movimientos del tercer intervalo mediante las siguientes tablas:

Tabla XIV. Descripción del movimiento para el tobillo

Evento	Acción
Durante la etapa de balanceo.	El pie se mueve de la posición inicial de flexión plantar al desprenderse del suelo a una posición esencialmente neutra (0°) que se mantiene durante toda la etapa de balanceo.

Fuente: HERNÁNDEZ, Francisco. *Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana*. p. 45.

Tabla XV. Descripción del movimiento para la rodilla

Evento	Acción
Entre el despegue del pie y la parte media de la etapa de balanceo.	La rodilla se flexiona de una posición inicial de aproximadamente 40° a un ángulo de máxima flexión de aproximadamente 65° .
Entre la parte media de la etapa de balanceo y el contacto del talón.	La rodilla se extiende casi completamente hasta el último instante de la etapa de balanceo.

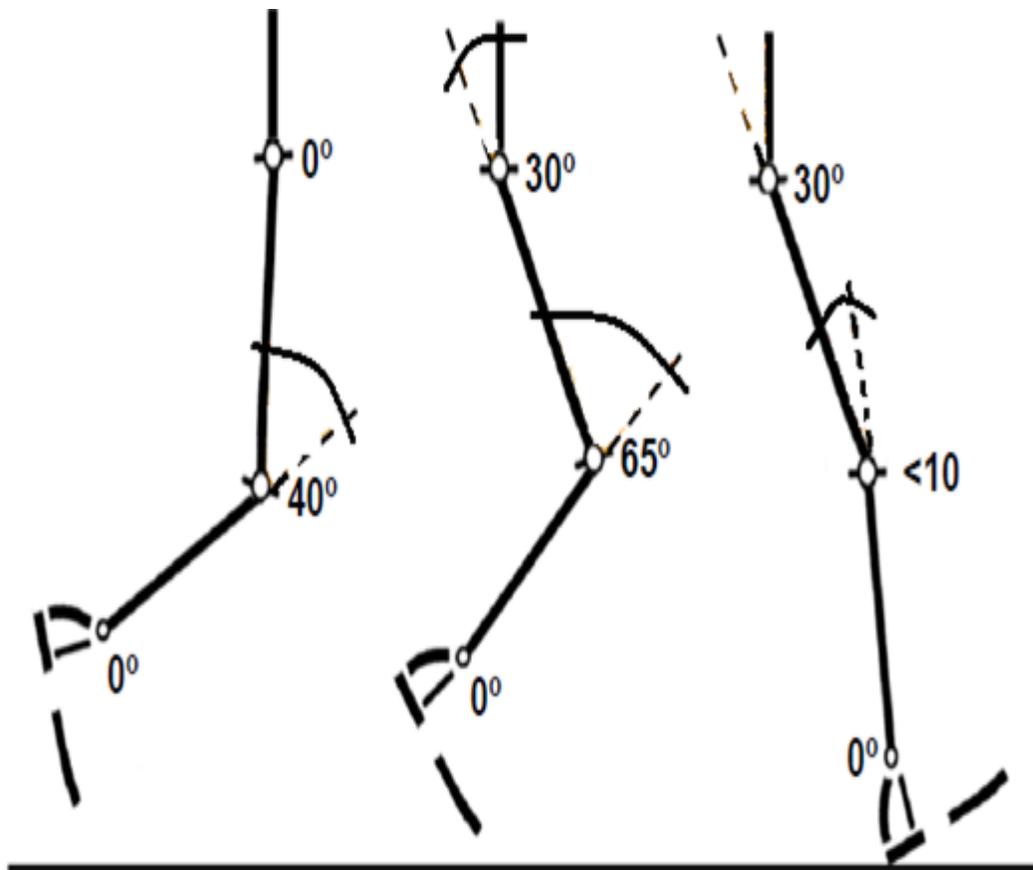
Fuente: HERNÁNDEZ, Francisco. *Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana*. p. 45.

Tabla XVI. Descripción del movimiento para la cadera

Evento	Acción
Durante la etapa de balanceo.	Partiendo de una posición neutral, la articulación de la cadera se flexiona aproximadamente 30°

Fuente: HERNÁNDEZ, Francisco. *Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana*. p. 45.

Figura 56. Ilustración del movimiento para la cadera en el tercer intervalo



Fuente: HERNÁNDEZ, Francisco. *Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana*. p. 45.

4.5.3. El centro de gravedad

En la marcha de una persona el aparato locomotor imprime al centro de gravedad en el cuerpo un movimiento vertical y otro horizontal que ocasionan un gasto de energía cinética y potencial debido al desplazamiento rítmico vertical. En los periodos de doble apoyo el centro de gravedad se encuentra en su punto más bajo y en los periodos de apoyo unipodal, alcanza su punto más alto.

El aumento del centro de gravedad provocado por la elevación de la energía potencial almacenada, alcanza un valor máximo en el momento de mayor elevación. Cuando desciende va transformándose en energía cinética, la cual es máxima en el punto más bajo y es empleada para impulsar el cuerpo hacia delante mientras va transformando de nuevo en energía potencial.

4.5.4. La cinética de la marcha

La cinética de la marcha involucra fuerzas como la de gravedad, de reacción y fricción, las cuales hacen que el ser humano pueda movilizarse físicamente de un punto de origen a un destino.

4.5.4.1. La fuerza de gravedad

La fuerza de gravedad es la encargada de posicionar al cuerpo humano en estado de equilibrio en relación con un punto de referencia, que en este caso es el suelo. Cuando una persona está en estado de marcha, el centro de gravedad se está moviendo haciendo caer el cuerpo hacia adelante y abajo, aumentando la velocidad y transformando la energía potencial en cinética, ya que en este instante una pierna oscila como péndulo y se posiciona en el suelo.

4.5.4.2. La fuerza de reacción

La fuerza de reacción es ejercida cuando la persona posiciona el pie sobre el suelo, haciendo que se produzca una fuerza impulso y de frenado. La fuerza de impulso se crea cuando el talón del pie está en contacto con el suelo y por consiguiente este ejerce una fuerza contraria a la del talón del pie.

La fuerza de frenado se crea cuando la pierna oscila en el aire y cae en el suelo para posicionarse, con el propósito de frenar la marcha y soportar el peso del cuerpo y posicionarse al siguiente paso.

4.5.4.3. La fuerza de fricción

La fuerza de fricción es la encargada de actuar para que la persona no se resbale y caiga. Esta actúa entre el pie y el suelo y dependerá del tipo de materiales en contacto y de las fuerzas que ejercen presiones entre ellos.

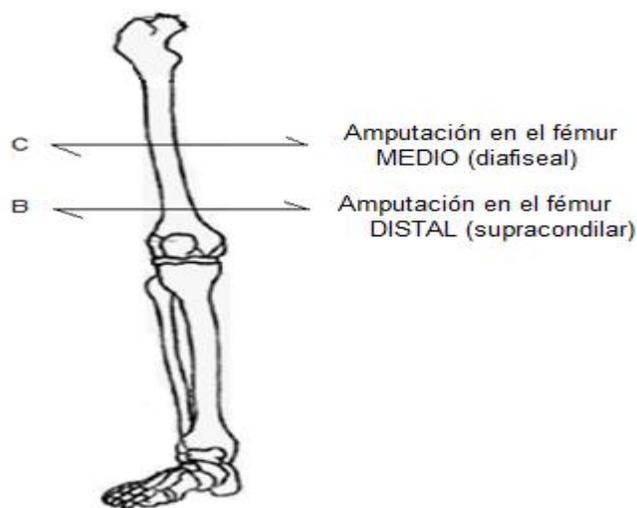
La persona que se encuentra en una superficie lisa tiene una fuerza de fricción mínima y por consiguiente se resbala. Es por eso que en superficies resbalosas la persona camina despacio.

5. DISEÑO DEL EXOESQUELETO ROBÓTICO PARA DISCAPACITADOS DE UN MIEMBRO INFERIOR

El diseño del prototipo exoesquelético se basa específicamente para una persona que sufre de amputación en el fémur distal (supracondilar) o fémur medio (diafiseal). Es decir personas con amputación de una pierna arriba de la rodilla.

La marcha humana tiene los movimientos más importantes en el plano sagital, correspondientes a los intervalos de flexión y extensión de la pierna y de la rodilla. Por ello el exoesqueleto se diseña para que los actuadores realicen su función principal en el plano sagital.

Figura 57. Tipos de amputaciones en la pierna de una persona



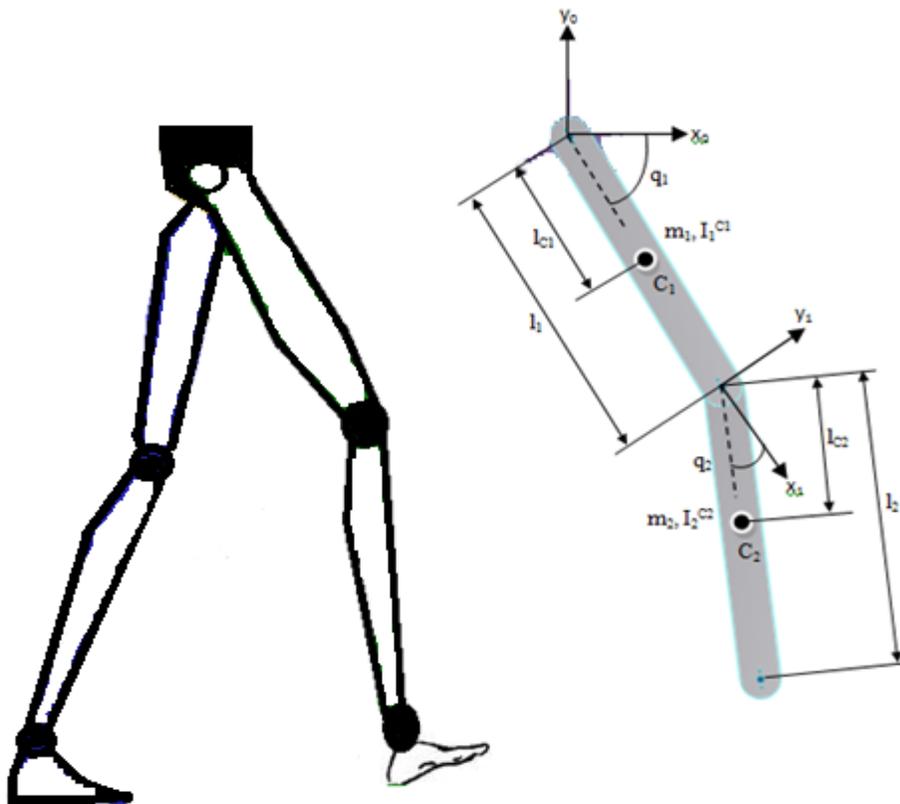
Fuente: <http://cuerpohumano2009.galeon.com/inferior.html>. Consulta: octubre de 2013.

5.1. El diseño del prototipo exoesquelético

El prototipo exoesquelético se compone de una estructura mecánica y electrónica, con el propósito de modelar una pierna humana como una cadena cinemática de dos eslabones y dos articulaciones rotacionales.

El control de las variables de un miembro inferior en la marcha humana se debe de analizar análogamente como una cadena cinemática de un robot planar de dos eslabones, tal y como se observa a continuación.

Figura 58. Modelado de una pierna humana en una cadena cinemática



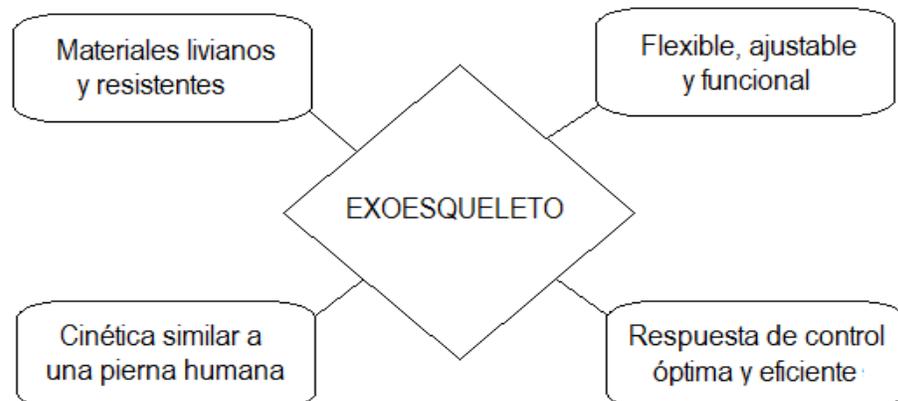
Fuente: elaboración propia, con programa Paint.

5.1.1. Consideraciones del diseño

El prototipo debe ser funcional, robusto y óptimo. Tomando en cuenta la calidad de materiales y la eficiencia de sus procesos (mecánicos y eléctricos), se debe de cumplir al menos con las siguientes consideraciones.

- El prototipo debe ser manufacturado con materiales livianos y resistentes para que pueda ser usado por personas dentro de un rango de peso.
- Debe ser flexible, ajustable y funcional para cualquier persona dentro de un rango de edad, estatura y peso.
- Debe tener aproximadamente la misma cinemática que una pierna humana.
- La respuesta de control debe ser funcional en tiempo, consumo de energía y configuración del sistema.

Figura 59. **Consideraciones del prototipo exoesquelético**



Fuente: elaboración propia.

5.1.2. Mecánica del prototipo exoesquelético

La parte mecánica del prototipo se basa de una estructura compuesta del encaje para el soporte y acople del muñón (parte de la pierna amputada), los eslabones y articulaciones manufacturados con materiales flexibles y resistentes para que la persona se sienta cómoda al utilizarla.

5.1.2.1. Encaje del prototipo

El encaje entre el muñón (pierna amputada) y el exoesqueleto debe ser flexible y cómodo para que la persona no tenga molestias de usar el prototipo. Para ello existen materiales flexibles y comerciales en el campo de las prótesis como la silicona, que es un polímero cuyo material es inodoro, incoloro, inerte y estable a altas temperaturas. La manufactura del encaje debe ser hecha de manera que el conjunto esté compuesto por una abrazadera para la cintura y una sección cónica para acoplar el muñón (pierna amputada) sin esfuerzo y molestia, además de asegurar el encaje mediante cinchos de velcro.

5.1.2.2. Eslabones del prototipo

La manufactura de los eslabones del exoesqueleto que comprende el fémur y la tibia con el peroné debe ser de materiales livianos y robustos como el aluminio o titanio. Esto se debe a que ambos materiales poseen buenas propiedades mecánicas para este tipo de aplicaciones. El eslabón que comprende el fémur debe ser manufacturado a modo de brindar una oscilación análoga a una pierna sin dificultad alguna y que se acople adecuadamente al muñón, mientras que el eslabón de la tibia con el peroné debe ser manufacturado a modo de brindar el soporte necesario al peso de la persona en la fase de apoyo de la marcha humana.

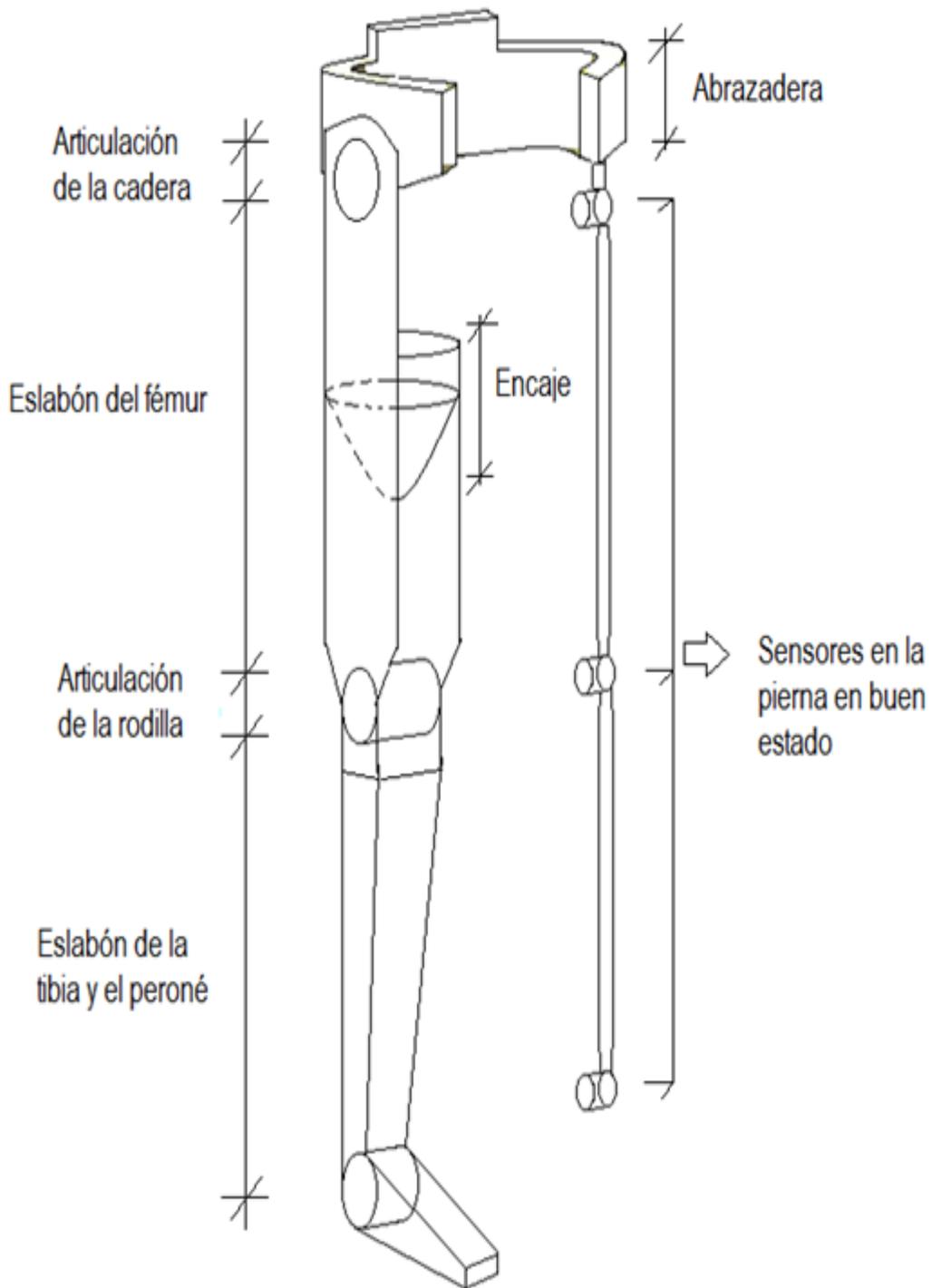
5.1.2.3. Articulaciones del prototipo

Las articulaciones que se van a diseñar son para la cadera y a la rodilla. Haciendo la salvedad que la parte del tobillo no se considera en la propuesta debido a que el análisis se hace para una cadena cinemática de dos eslabones. En este caso la articulación del tobillo debe estar acoplada mecánicamente al pie del prototipo.

La articulación de la rodilla debe tener aspectos importantes como los movimientos de flexión y extensión para realizar una correcta oscilación y brindar el soporte al peso de la persona. Por eso se deben tomar en cuenta las siguientes recomendaciones para el diseño.

- La articulación debe ser en bisagra o troclear para los dos movimientos.
- La fricción en la articulación del exoesqueleto, como lo hace un cartílago en una rodilla humana.
- La lubricación de la articulación del prototipo, como lo hace el líquido sinovial en una rodilla humana.
- Debe limitarse la oscilación de la articulación solo para el plano sagital, así como lo hacen los ligamentos para limitar los movimientos de la rodilla.
- El amortiguamiento de los eslabones en la parte de la articulación del prototipo para no dañar a los actuadores, como lo hacen las bursas entre las uniones de los huesos en la rodilla.

Figura 60. **Diseño mecánico del prototipo exoesquelético**



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.

5.1.3. Electrónica del prototipo exoesquelético

La estructura electrónica del prototipo tiene que contener al menos cinco sistemas principales que se detallan a continuación:

- Unidad central de procesamiento (UCP)
- Los sensores
- Los actuadores
- Comunicación entre dispositivos
- Las fuentes de alimentación

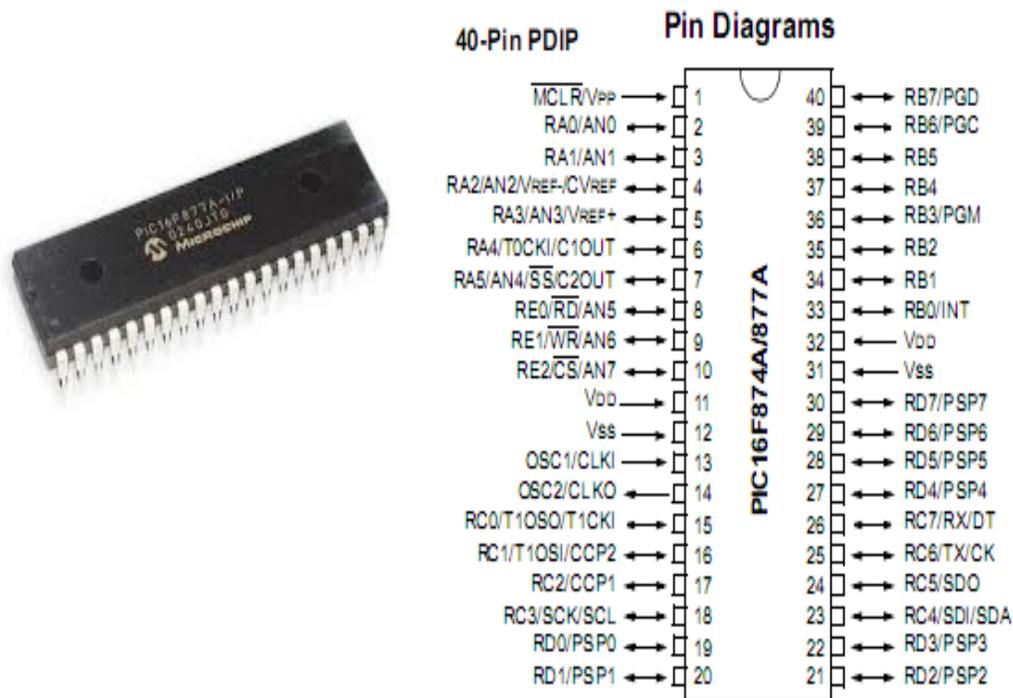
5.1.3.1. Unidad central de procesamiento (UCP)

La UCP es la encargada de procesar la información recolectada mediante los sensores y enviar las órdenes hacia los distintos actuadores del prototipo.

El procesador debe ser liviano, económico y robusto, dejando a criterio del lector el uso de cualquier otro tipo de procesador acorde al procesamiento que se necesita.

El microcontrolador PIC 16F877A es un dispositivo comúnmente utilizado en la actualidad, fabricado por la empresa Microchip Technology Inc. y el propuesto a utilizar debido a que es económico, comercial, versátil, y eficiente en este tipo de procesamientos. A continuación se incluye una muestra de un microcontrolador de la familia 16Fxxx.

Figura 61. Esquema de un microcontrolador de la familia PIC 16F877A



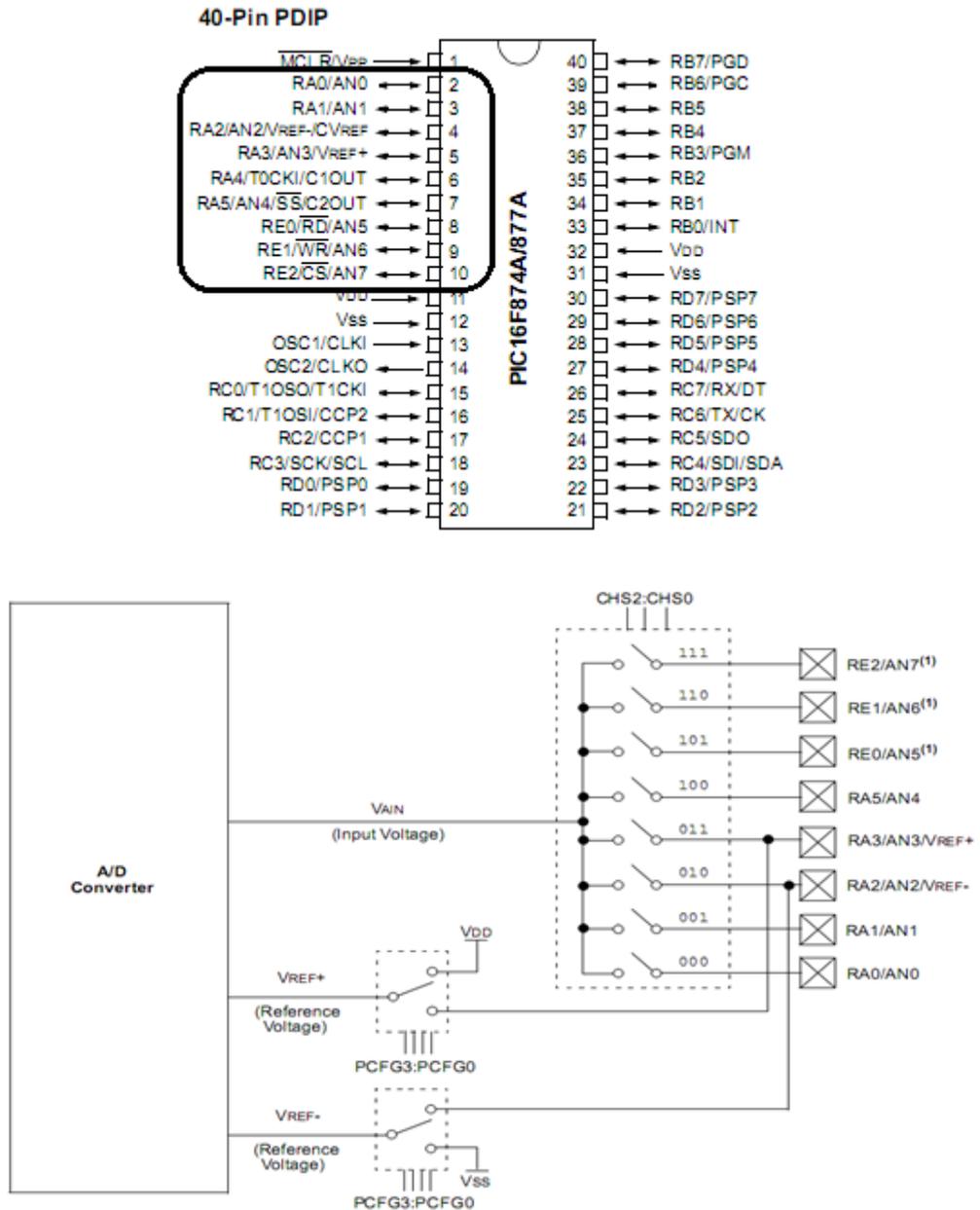
Fuente: <https://www.microchip.com/pagehandler/en-us/family/16bit/>.

Consulta: octubre de 2013.

El microcontrolador 16F877A tiene entre sus características el módulo analógico interno llamado ADC de *Analogic Digital Convert* por sus siglas en inglés. Este módulo se identifica como AN0, AN1, ..., AN7 en el puerto A del dispositivo con un tamaño de ocho bits en todo el puerto A, del dispositivo con el cual se pueden capturar ocho diferentes señales analógicas para luego ser procesadas.

El módulo ADC internamente hace uso de los registros RA0, RA1, RA2, ..., RA7, para lo cual es necesario habilitarlos a la hora de utilizarlos. A continuación se ilustran los registros a habilitar en el módulo ADC del microcontrolador.

Figura 62. Diagrama esquemático de la posición del módulo ADC en el microcontrolador PIC 167877A



Fuente: <https://www.microchip.com/pagehandler/en-us/family/16bit/>.

Consulta: octubre de 2013.

Figura 63. Diagrama esquemático de los registros utilizados en el módulo ADC

REGISTER 11-1:											
ADCON0 REGISTER (ADDRESS 1Fh)											
R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	U-0	R/W-0			
ADCS1	ADCS0	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	—	ADON				
bit 7											bit 0
PCFG <3:0>	AN7	AN6	AN5	AN4	AN3	AN2	AN1	AN0	VREF+	VREF-	C/R
0000	A	A	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS	8/0
0001	A	A	A	A	VREF+	A	A	A	AN3	VSS	7/1
0010	D	D	D	A	A	A	A	A	VDD	VSS	5/0
0011	D	D	D	A	VREF+	A	A	A	AN3	VSS	4/1
0100	D	D	D	D	A	D	A	A	VDD	VSS	3/0
0101	D	D	D	D	VREF+	D	A	A	AN3	VSS	2/1
011x	D	D	D	D	D	D	D	D	—	—	0/0
1000	A	A	A	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	6/2
1001	D	D	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS	6/0
1010	D	D	A	A	VREF+	A	A	A	AN3	VSS	5/1
1011	D	D	A	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	4/2
1100	D	D	D	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	3/2
1101	D	D	D	D	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	2/2
1110	D	D	D	D	D	D	D	A	VDD	VSS	1/0
1111	D	D	D	D	VREF+	VREF-	D	A	AN3	AN2	1/2

A = Analog input D = Digital I/O
C/R = # of analog input channels/# of A/D voltage references

Fuente: elaboración propia.

Es necesario utilizar el módulo para el procesamiento de señales analógicas recolectadas por los sensores en pequeñas amplitudes de voltaje, las cuales al ser procesadas por el módulo ADC las convierte en señales discretas (binarias) para manipular los respectivos actuadores.

5.1.3.2. Sensores del prototipo

La elección de los sensores se hace de acuerdo con la flexibilidad de acople en el exoesqueleto. Se propone la utilización de las resistencias variables (potenciómetros), los *encoders* (incrementales), los sensores de presión, y de aceleración y otros que recolecten la información deseada para luego procesarla.

En el diseño del exoesqueleto se deben tomar en cuenta las siguientes variables para su procesamiento.

- El estado (posición) de la pierna en buen estado
 - Cuando la pierna está fija o en estado de apoyo
 - Cuando la pierna está en balanceo o movimiento pendular
- La velocidad de la marcha
- Las fuerzas de acción y reacción

5.1.3.2.1. Los sensores de la cadera

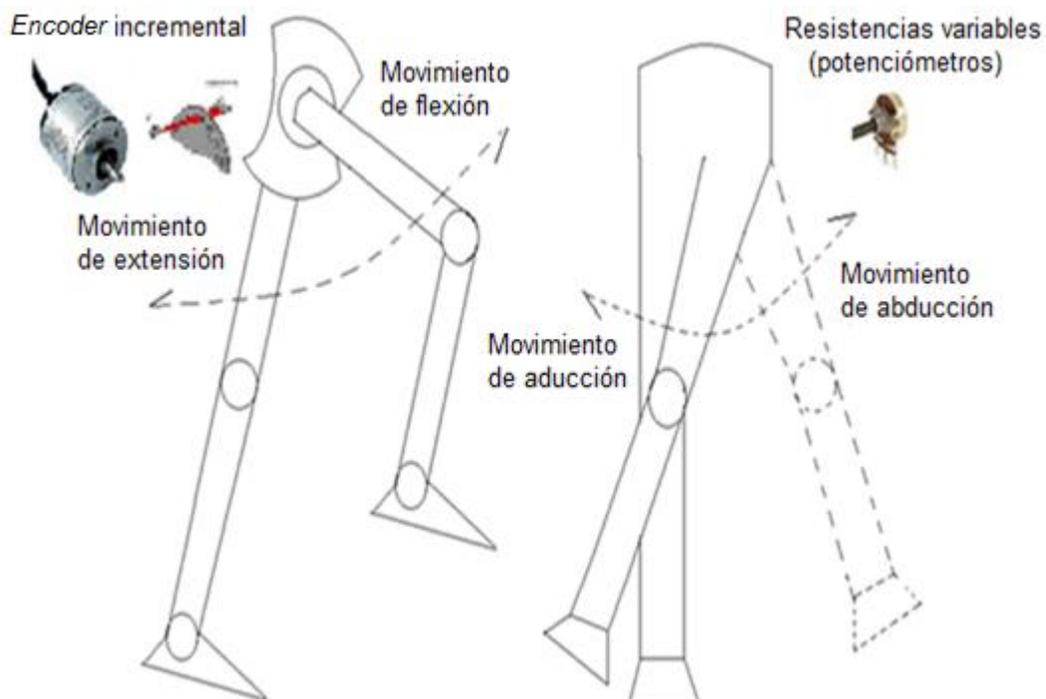
En la cadera de la persona se tienen los movimientos de flexión y extensión además del de aducción y abducción.

La detección del movimiento de flexión y extensión se realiza con un *encoder* incremental como propuesta para detectar los grados de libertad en el plano sagital de la pierna en buen estado. Mientras que la detección del movimiento de aducción y abducción, por si fuera necesario, puede ser detectado con un potenciómetro como propuesta en el plano frontal.

La detección de las señales para los movimientos de la cadera son correspondientemente digitales para la flexión y extensión por el uso de un *encoder* incremental, y señales analógicas para el movimiento de aducción y abducción por el uso de un potenciómetro.

El rango de movimiento en el plano sagital para la flexión y extensión debe ser de 180° , ya que la cadera no tiene una rotación de 360° . Por ello el sensor debe ser configurado para este rango. Mientras que el rango de medición en el plano frontal para el movimiento de aducción y abducción también debe estar limitado a valor menor de 180° , haciendo la aclaración de que este valor es opcional para el presente diseño debido a las limitantes que se plantearon con anterioridad.

Figura 64. **Posición de los sensores en la pierna de la persona**



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.

5.1.3.2.2. Los sensores de la rodilla

La detección de la señal de la rodilla en buen estado para el movimiento de flexión y extensión en el actuador del exoesqueleto se realiza mediante un *encoder* incremental, con el propósito de regular la distancia de los pasos de persona.

El funcionamiento de un *encoder* incremental análogamente es igual al de un cronómetro en el cual solamente se mide el tiempo de incremento que transcurre entre un tiempo inicial y un tiempo final, sin importar en qué hora del día o la noche se esté midiendo.

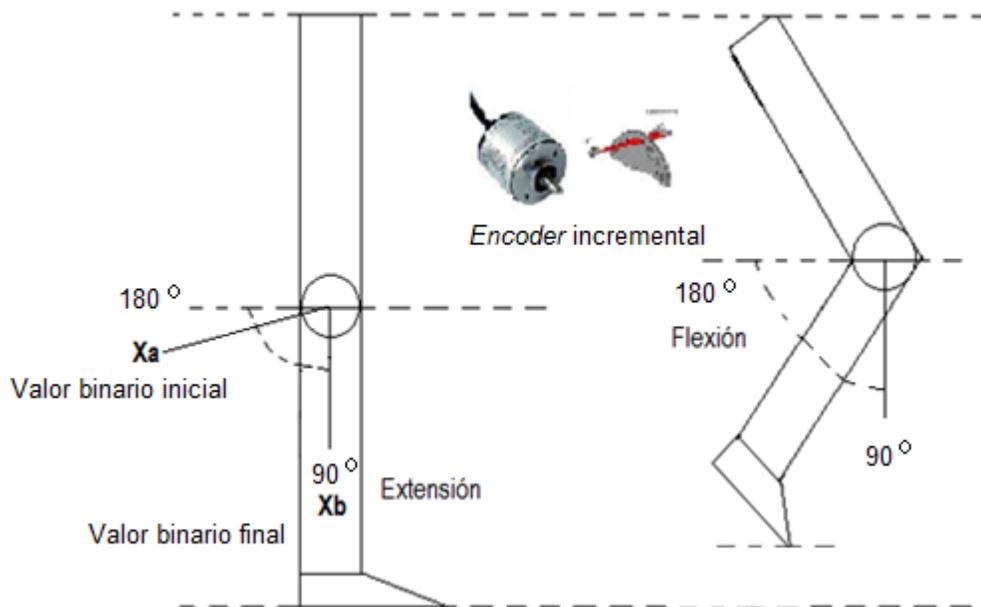
En el *encoder* incremental la medición es el incremento angular que hay entre un inicio y un final, no importando el sentido de la misma.

La medición se debe realizar en un rango de posición de 90° perpendicular a la pierna de la persona, en donde hay un valor inicial X_A correspondiente a 170° como posición máxima de flexión de la rodilla respecto del horizonte. Por otro lado, hay un valor final X_B correspondiente a 90° como posición máxima de extensión de la rodilla respecto del horizonte.

La diferencia de $X_A - X_B$ son valores que se pueden configurar para tener una resolución de detección más exacta y poder ejercer reacción por parte de los actuadores del exoesqueleto.

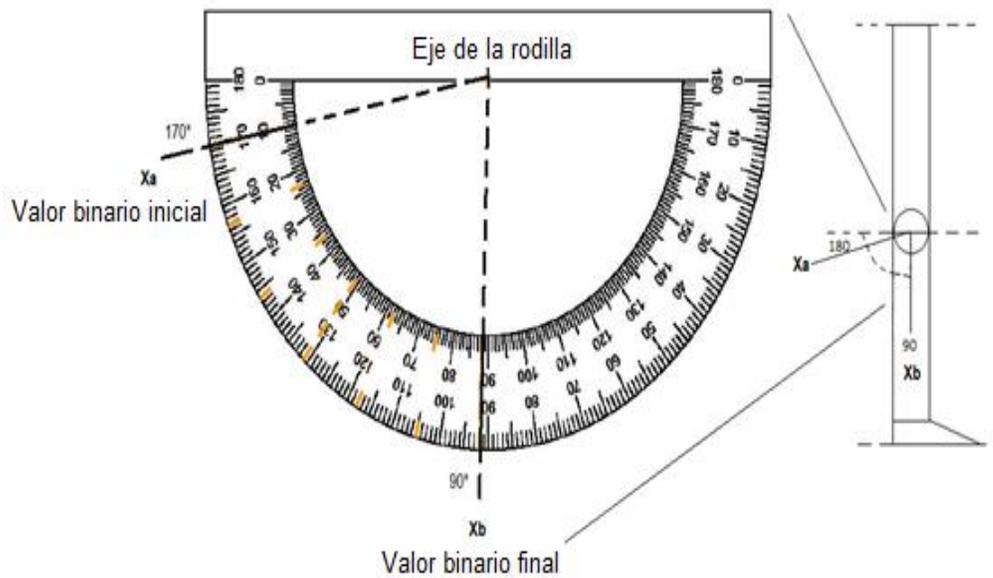
En la figura se observa la detección del rango mediante el *encoder* incremental para los movimientos de flexión y extensión.

Figura 65. **Movimientos de la rodilla de una persona humana**



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.

Figura 66. **Rango de medición y detección del *encoder* en la rodilla**



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.

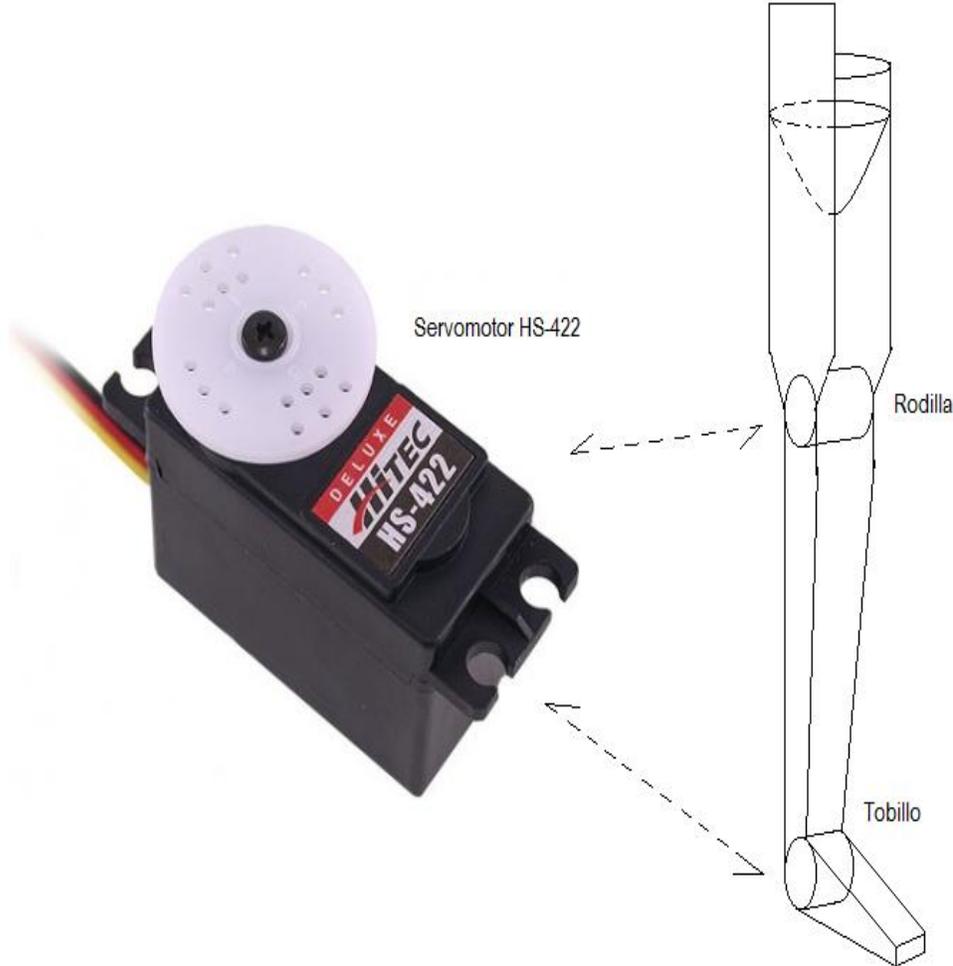
5.1.3.3. Actuadores del prototipo

El correcto funcionamiento del prototipo es muy importante debido a que se pondrá en operación y funcionamiento al exoesqueleto, y por ello se propone a los servomotores como los elementos actuadores por sus buenas características de precisión, control, tamaño y el par mecánico que poseen, entre otras características. En el mercado existen varios tipos de servomotores, de los cuales se recomienda utilizar el servomotor HS - 422 de la empresa HITEC, cuyas características se mencionan a continuación:

- El torque va desde los 3.3 kg-cm a 4.8 volts hasta los 4.1 kg-cm a 6 volts.
- El peso es de 45.5 gramos, que lo hace muy liviano.
- El rango de voltaje que maneja está dentro de 4.8 - 6 volts.
- Alta precisión y suavidad mediante el eje mecánico que posee.
- El servo puede modificarse muy fácilmente para rotación continua mediante el ajuste de sus tornillos en el eje mecánico.
- Fácil identificación de las conexiones, debido a que posee solamente tres entradas, que son las señales de alimentación (positivo y negativo) y la señal digital de mando.

El servomotor HS – 422 es un dispositivo muy robusto y eficiente; pero el eje mecánico debe acoplarse a un sistema de engranajes para regular el torque en el exoesqueleto a manera de optimizar las funciones de la marcha humana.

Figura 67. Posición del actuador HS - 422 en la rodilla del exoesqueleto



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.

5.1.3.4. Comunicación entre dispositivos

La comunicación de información entre la UCP y los dispositivos necesitan al menos tres entradas básicas para la detección de las señales del entorno y al menos dos salidas para el envío de las órdenes hacia los actuadores.

El intercambio de información entre dispositivos para realizar un proceso de manera óptimo está relacionado con el tiempo de retardo de la comunicación. Es decir que los tiempos de envío y recepción de datos entre los dispositivos tienen que ser lo más cortos posibles para que el exoesqueleto funcione aproximadamente en tiempo real. Esto se logra utilizando un buen protocolo de comunicación y optimizando el cableado del sistema para evitar interferencias como la EMI de *ElectroMagnetic Interference* por sus siglas en inglés y el ruido que pueda ser ingresado en las respectivas líneas de comunicación.

El protocolo de comunicación propuesto para interconectar el sistema del exoesqueleto es el bus I2C de capa 2, eficiente, el cual transporta los datos de manera serial. A continuación se muestran las características de este protocolo:

- Bus de comunicación síncrono: la comunicación es controlada por una señal de reloj en común.
- Bus formado por dos líneas: una línea llamada SDA (*Serial data line*) para transportar datos, y la línea SCL (*Serial clock line*) para el reloj.
- Las velocidades de transmisión son de 100 Kbits/s de forma estándar, 400 Kbits/s de manera rápida y de 3,4 Mbits/s para más rápida.
- Cada dispositivo del bus tiene una dirección única.
- El bus contiene un dispositivo maestro y varios esclavos.
- La comunicación del bus entre el dispositivo maestro y los esclavos se hacen de manera serial y en forma bidireccional.

El inconveniente de usar este protocolo es que los dispositivos que se van a utilizar deben de tener este bus para la interconexión de los mismos. Por ello se debe verificar que los dispositivos periféricos tengan este protocolo. La segunda opción para comunicar los dispositivos es mediante cable blindado (apantallado) para evitar el ruido. Este tipo de comunicación es la más utilizada, fácil y económica, pues solamente se transportan los datos de un punto a otro, pero también son vulnerables a las interferencias externas.

5.1.3.5. Fuente de alimentación

La fuente de alimentación en los sistemas electrónicos es de suma importancia para el buen funcionamiento de los mismos. Por ello la fuente para el exoesqueleto debe estar basada en baterías eficientes y económicas, pero con un largo periodo de descarga para que el prototipo pueda funcionar adecuadamente por un largo periodo.

El tipo de baterías comercialmente conocidas en el consumo electrónico son de suma importancia por la calidad que ofrecen. Por ello se propone el uso de las baterías de Li-Ion (iones de litio) y por otro lado las baterías de LIPO (polímero de litio). Ambas son recargables y comúnmente utilizadas en teléfonos celulares, agendas electrónicas, laptops, etc. Y ambas tienen sus ventajas y desventajas, por ello el uso de cualquiera se deja a criterio del cliente.

La batería de litio polímero tiene los menores costes de fabricación, adaptabilidad a una amplia variedad de formas de empaquetado, confiabilidad y resistencia, mientras que la batería de litio-ion acumula mayor carga por unidad de peso y volumen, la descarga es lenta por su capacidad de almacenaje y por ser menos pesadas.

Figura 68. **Batería de LIPO y batería de Li-Ion**



Fuente: <http://www.shoptronica.com/celulas-y-baterias-lipo/270-pack-de-baterias-de-li-po-planas-de-74v.html> http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_de_ion_de_litio.

Consulta: noviembre de 2013.

5.2. Sistema de control

El interés ahora se basará en el control del conjunto de dispositivos del exoesqueleto, de manera que haya una retroalimentación entre las variables de entrada con las de la salida. Para lograr esto el sistema de control debe contener una retroalimentación de lazo cerrado para que el proceso funcione adecuadamente.

El diseño considera tres tipos de variables de carácter importante que se deben controlar como el estado (posición) de la pierna y el exoesqueleto, la velocidad angular y la fuerza de reacción del suelo.

5.2.1. Variable de estado o posición

El estado (posición) del exoesqueleto inicialmente debe estar de manera paralela a la pierna para el inicio del ciclo de la marcha. Se debe tomar un valor de referencia (*set point*) como variable de entrada para hacer la comparación entre la pierna y el exoesqueleto para obtener un valor actual como variable de salida.

La comparación la realiza el *encoder* incremental mediante el muestreo que se realiza en la cadera de la pierna en buen estado. Estos datos son los que se procesan mediante el microcontrolador para enviar las órdenes a los actuadores del prototipo.

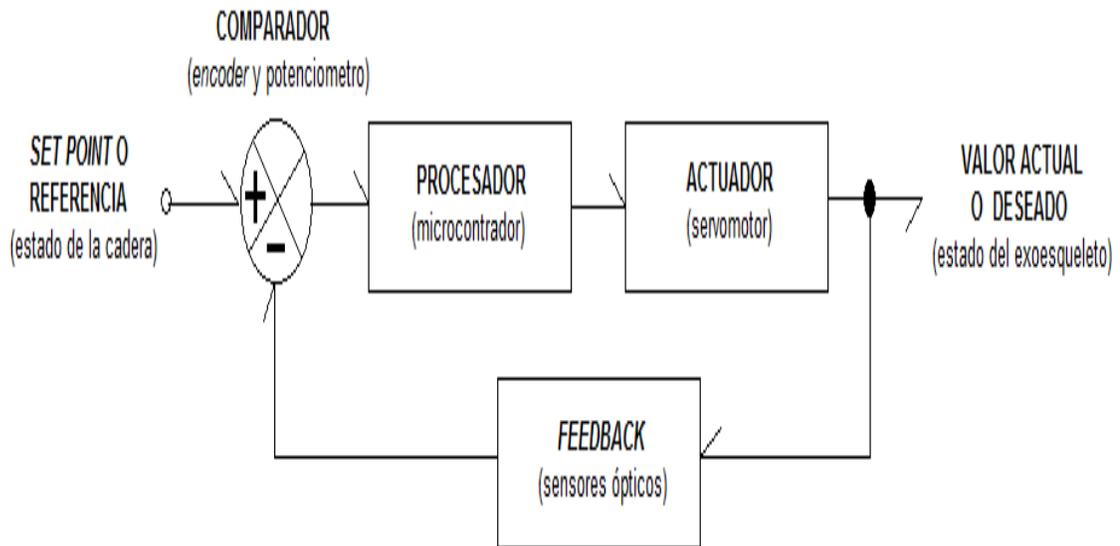
La retroalimentación (*feedback*) se realiza mediante sensores ópticos para validar el estado del exoesqueleto en relación con el estado de la pierna buena.

Tabla XVII. Sistema de control para el estado de la pierna humana

Entradas	SISTEMA DE CONTROL				Salidas
<i>Set point</i>	Comparador	Procesador	Actuador	<i>Feedback</i>	Valor actual
Estado de la cadera: -Apoyo -Balanceo	El <i>encoder</i> El potenciómetro	Microcontrolador	Servomotor	Sensores ópticos	Estado del exoesqueleto: -Apoyo - Balanceo

Fuente: elaboración propia.

Figura 69. **Diagrama del sistema de control para el estado de la pierna humana**



Fuente: elaboración propia.

5.2.2. Velocidad angular

La velocidad angular que debe ser medida en la rodilla de la pierna será el valor de referencia (*set point*) para que el respectivo actuador en la articulación del exoesqueleto regule la velocidad de giro y se acople a la marcha de la persona.

El *set point* tomará las muestras angulares (grados de libertad) que posee la rodilla cuando se flexiona o se extiende y las enviará al microcontrolador para hacer una verificación del cambio de posición angular en relación con el tiempo, para así poder enviar las órdenes al actuador del exoesqueleto.

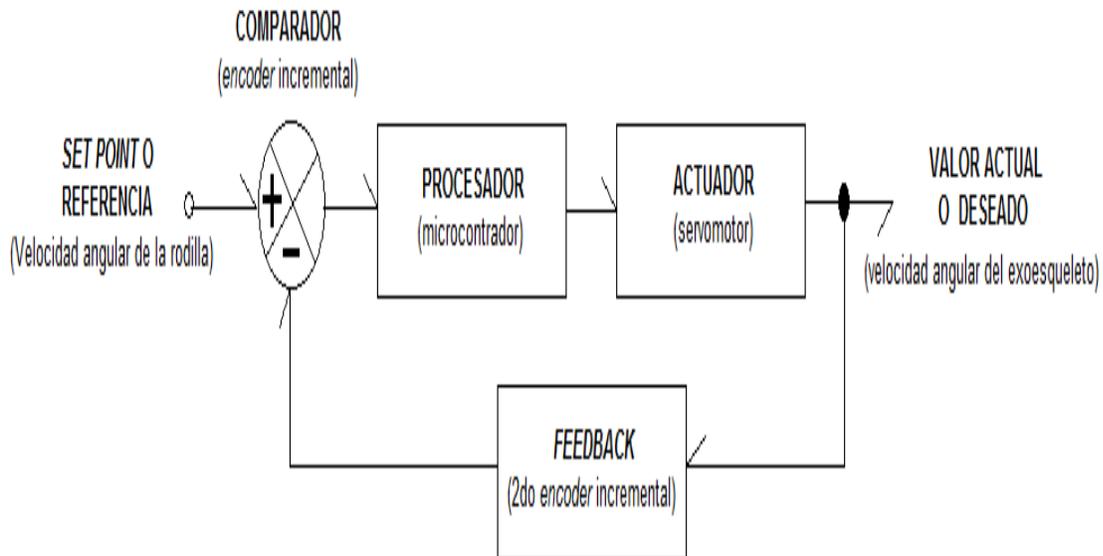
La retroalimentación (*feedback*) será detectada colocando un segundo *encoder* incremental en la articulación del exoesqueleto, para que pueda monitorear el cambio de posición angular en relación con el tiempo y hacer la comparación con el *encoder* que se sitúa en la rodilla de la persona, y poder tener control de una marcha normal.

Tabla XVIII. **Sistema de control para la velocidad angular de la rodilla**

Entradas	SISTEMA DE CONTROL				Salidas
<i>Set point</i>	Comparador	Procesador	Actuador	<i>Feedback</i>	Valor actual
Velocidad angular de la rodilla	<i>Encoder</i> incremental	Microcontrolador	Servomotor	Segundo <i>encoder</i> Incremental	Velocidad angular del exoesqueleto

Fuente: elaboración propia.

Figura 70. **Sistema de control para la velocidad angular**



Fuente: elaboración propia.

5.2.3. Fuerza de acción y reacción

Las fuerzas que interactúan en las piernas de una persona son importantes, las cuales se deben considerar para que se pueda realizar una marcha normal.

Dentro de las fuerzas a tomarse en consideración en la marcha de la persona se encuentran:

- La fuerza ejercida de la cadera hacia la rodilla (fuerza de acción) y de la rodilla hacia la cadera (fuerza de reacción) en la fase de apoyo modal.
- La fuerza ejercida de la tibia y el peroné hacia el suelo (fuerza de acción) y del suelo hacia la tibia y el peroné (fuerza de reacción) en la fase de apoyo modal.

Las fuerzas medidas deben servir como referencia para controlar la optimización y el rendimiento de los actuadores en el exoesqueleto, con el propósito de que el prototipo soporte el peso de la persona y realice la marcha humana.

El primer *set point* es el peso de la persona en relación con el suelo, mientras que el segundo *set point* corresponde a las fuerzas de reacción de la pierna. Estos valores se deben detectar mediante el uso de sensores de fuerza colocados preferiblemente en la cadera de la pierna en buen estado, cuyo propósito es tener los valores de referencia para darle información al microcontrolador y que este pueda enviar las órdenes a los servomotores para la optimización del rendimiento cuando están en uso y cuando no lo están.

El *feedback* debe monitorear las fuerzas de los actuadores cuando están en uso y enviarle información al microcontrolador para que regule la energía en los respectivos actuadores. Para lograrlo se propone la utilización de sensores de fuerza o galgas extensiométricas colocados en la articulación de la rodilla en el exoesqueleto.

El sistema de control para la gestión y control de las fuerzas de acción y reacción en las piernas de una persona se puede entender de mejor manera mediante la siguiente tabla consecutivamente con la figura que ilustra el proceso de las mismas.

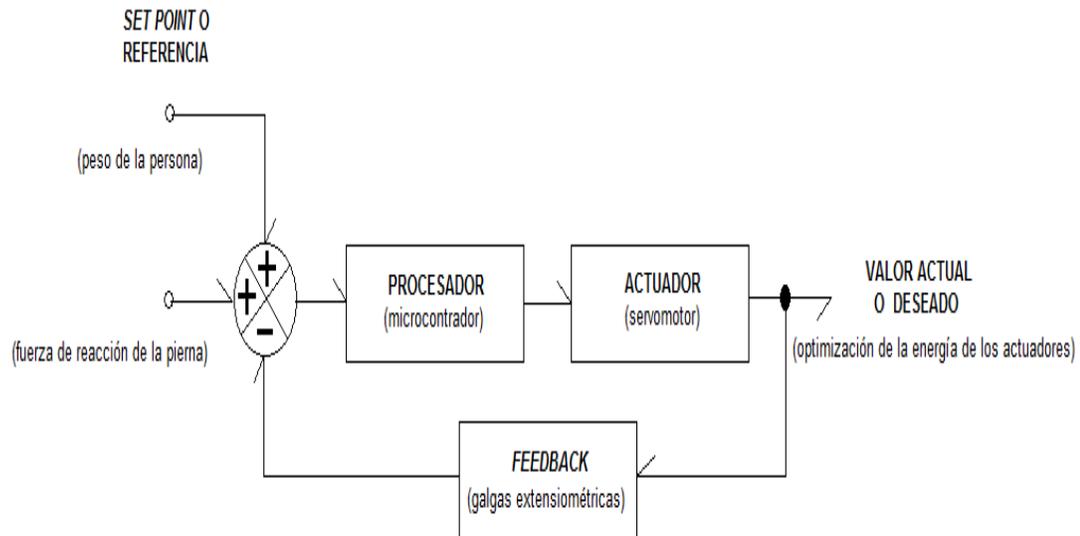
Tabla XIX. **Sistema de control para la fuerza de reacción**

Entradas	SISTEMA DE CONTROL				Salidas
Set point 1	Set point 2	Procesador	Actuador	Feedback	Valor actual
Fuerzas de reacción en la pierna	El peso de la persona	Microcontrolador	Servomotores	Galgas extensiométricas	Optimización y rendimiento de los actuadores

Fuente: elaboración propia.

El funcionamiento del sistema de control en esta etapa es muy importante debido a que las medidas de referencia se usaran para automatizar el movimiento de la marcha humana del exoesqueleto y con ello la persona pueda realizar el ciclo de balanceo y movimiento de la pierna en conjunto con el sistema para poder caminar normalmente.

Figura 71. **Sistema de control para la fuerza de reacción**



Fuente: elaboración propia.

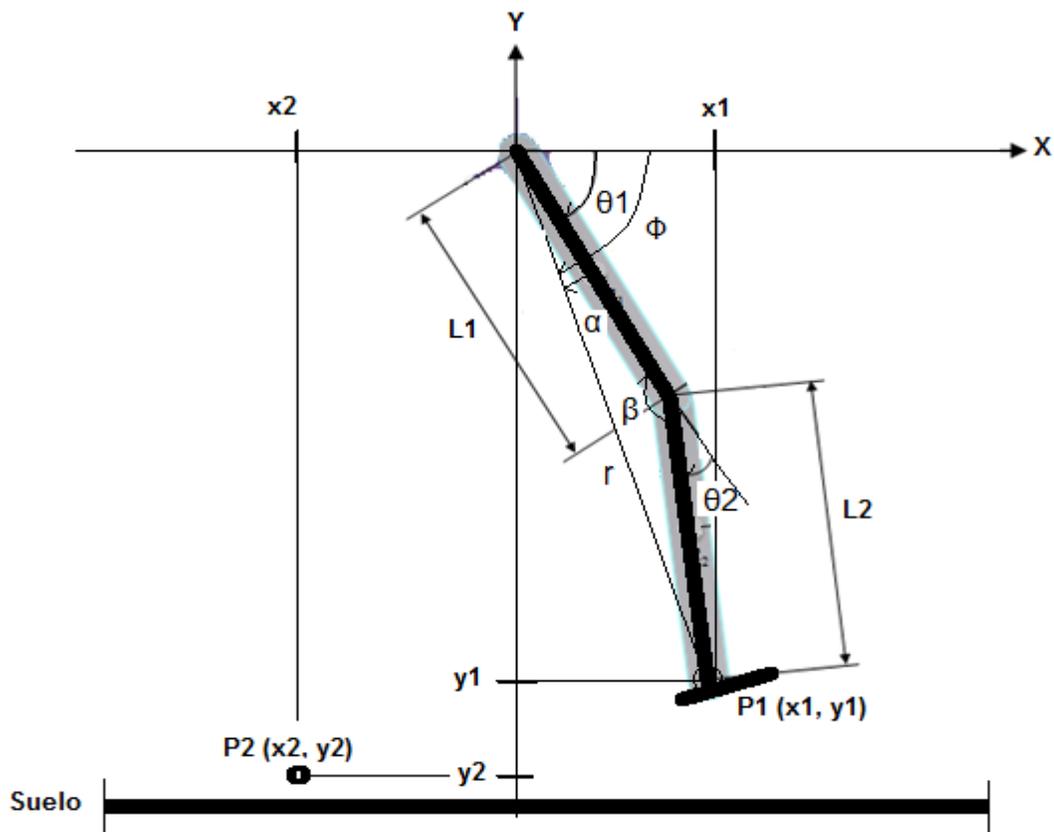
5.3. EL análisis de la cinemática del prototipo exoesquelético

El análisis de la cinemática del prototipo exoesquelético debe estar dentro de un rango de operación en el plano sagital para realizar la marcha humana. Para ello se deben tener dos puntos de referencia donde $P_1(x_1, y_1)$ es el punto máximo, mientras que $P_2(x_2, y_2)$ es el punto mínimo de oscilación del prototipo exoesquelético.

Los puntos máximo y mínimo de la fase de oscilación del prototipo exoesquelético son datos que se tomarán de la posición del tobillo del exoesqueleto cuando se realiza la marcha en la fase de oscilación, por lo que se deben tomar en cuenta las medidas de la cadera hasta el tobillo de la persona, para hacer una buena medición.

Por otro lado, el análisis para calcular la orientación del prototipo se hace mediante la cinemática inversa por medio de los métodos geométricos como forma más sencilla y eficiente para el cálculo de la orientación a diferencia de las ecuaciones homogéneas, que para este caso son más complejas de analizar que en cinemática directa donde se busca calcular la posición de un efector final.

Figura 72. **Análisis del prototipo exoesquelético mediante cinemática inversa**



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.

Se formarán ecuaciones de los ángulos θ_1 y θ_2 en función de los eslabones y los puntos $P_1(x_1, y_1)$ y $P_2(x_2, y_2)$ que darán la orientación del exoesqueleto.

El cálculo del ángulo β se realiza mediante el teorema del coseno para el triángulo que se forma entre los eslabones de L_1 , L_2 y r .

$$r^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2\cos\beta \quad (\text{Ec. 1})$$

Despejando para β se obtiene la siguiente relación:

$$\beta = \cos^{-1} \frac{L_1^2 + L_2^2 - x_1^2 - x_2^2}{2L_1L_2} \quad (\text{Ec. 2})$$

Ahora bien, se tiene la relación de ángulos β y θ_2 mediante la siguiente ecuación:

$$\beta + \theta_2 = \pi \quad (\text{Ec. 3})$$

De la ecuación 3 se despeja para θ_2 y a la vez se sustituye la ecuación 2 para β y se obtiene la ecuación de θ_2 de la siguiente manera:

$$\theta_2 = \pi - \cos^{-1} \frac{L_1^2 + L_2^2 - x_1^2 - x_2^2}{2L_1L_2} \quad (\text{Ec. 4})$$

Para el cálculo de θ_1 primero se define para el ángulo Φ mediante la siguiente relación:

$$\Phi = \tan^{-1} \frac{y_1}{x_1} \quad (\text{Ec. 5})$$

Después se calcula el ángulo α haciendo uso nuevamente del teorema del coseno para el triángulo r , $L1$ y $L2$ obteniendo lo siguiente:

$$L2^2 = L1^2 + r^2 - 2L1r\cos\alpha \quad (\text{Ec. 6})$$

De la ecuación 6 se despeja para α , obteniendo la siguiente ecuación:

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{L1^2 - L2^2 + r^2}{2L1r} \quad (\text{Ec. 7})$$

Ahora bien, se observa en la figura 72 que el ángulo Φ está compuesto por los dos ángulos α y θ_1 que se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\alpha + \theta_1 = \Phi \quad (\text{Ec. 8})$$

Despejando para θ_1 y sustituyendo la ecuación 7 para α , se obtiene la ecuación de θ_1 de la siguiente manera:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{Y1}{X1} - \cos^{-1} \frac{L1^2 - L2^2 + r^2}{2L1r} \quad (\text{Ec. 9})$$

El valor de r se encuentra mediante la relación de Pitágoras que relaciona el punto $P_1(x_1, y_1)$, tal como se observa en la figura 58:

$$X_1^2 + Y_1^2 = r^2 \quad (\text{Ec. 10})$$

Si se toma de nuevo la ecuación 9 y se sustituye la ecuación 10 para r, se redefine nuevamente para θ_1 obteniendo la siguiente relación:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{Y_1}{X_1} - \cos^{-1} \frac{L_1^2 - L_2^2 + X_1^2 + Y_1^2}{2L_1 \sqrt{X_1^2 + Y_1^2}} \quad (\text{Ec. 11})$$

De igual manera se hace el análisis para el punto $P_2(x_2, y_2)$, obteniendo las ecuaciones para los ángulos θ_1 y θ_2 .

Se puede observar que mediante el anterior análisis matemático el prototipo, exoesquelético propuesto puede ser orientado en el plano sagital entre el rango de operación de la marcha, conociendo dos posiciones.

Estos datos son importantes debido a que la unidad central de procesamiento del microcontrolador debe comparar los datos que se recolectan mediante los sensores colocados en la pierna en buen estado y los valores de los ángulos θ_1 y θ_2 que están en función de la posición y el valor de los eslabones del prototipo, para que se pueda realizar una marcha aproximadamente normal y lograr que la persona pueda caminar sin ningún problema.

CONCLUSIONES

1. El diseño del exoesqueleto robótico se realiza como una solución para sustituir un miembro inferior en una persona con amputación arriba de la rodilla.
2. Los movimientos de flexión y extensión del exoesqueleto robótico deben de estar limitados para un rango de operación y funcionamiento en el plano sagital del ciclo de la marcha humana.
3. El óptimo procesamiento de señales eléctricas depende del tipo de microcontrolador (PIC) y/o procesador que se utilice.
4. El óptimo rendimiento del exoesqueleto robótico depende del tipo de baterías que le sean instaladas.
5. El funcionamiento en tiempo real del exoesqueleto robótico depende del tipo y/o protocolo de comunicación que se utiliza entre dispositivos eléctricos.
6. La inteligencia del exoesqueleto robótico se basa fundamentalmente en la operación de los sistemas de control de lazo cerrado.
7. La robótica aplicada en la medicina es de gran ayuda para las personas que están incapacitadas permanentemente.

RECOMENDACIONES

1. Es importante la utilización del aluminio y/o titanio en la manufactura de la estructura del exoesqueleto robótico por ser metales livianos y con buenas características mecánicas.
2. En la manufactura de la estructura del exoesqueleto robótico debe tomarse en cuenta el rango de peso corporal de la persona que utilizará el prototipo para que este pueda funcionar adecuadamente.
3. Los dispositivos electrónicos que van a utilizar deben ser robustos y óptimos para que tengan un buen grado de confiabilidad.
4. Es de suma importancia tomar las correctas medidas y precauciones al momento de implementar el diseño del exoesqueleto robótico, ya que estará ayudando a caminar nuevamente a un ser humano.

BIBLIOGRAFÍA

1. BARRIENTOS, Antonio. *Fundamentos de robótica*. 2a ed. España: McGraw-Hill / Interamericana, 1997. 327 p. ISBN: 84-481-0815-9
2. CRAIG, John J. *Introduction to robotics: mechanics and control*. 2a ed. Estados Unidos: Addison Wesley Longman, 1989. 459 p. ISBN: 0-201-09528-9
3. DREXLER, Erick K. *Engines of creation, the coming era of nanotechnology*. Estados Unidos: Gedisa, 2005. 367 p. ISBN: 84 – 7432 – 494 – 7
4. HERNÁNDEZ STENGELE, Francisco. *Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana*. Trabajo de graduación de Ing. Electrónica y Computadoras. Escuela de Ingeniería y Ciencias, Universidad de las Américas, Puebla, México, 2008. 171 p.
5. MARTINI, Frederic H. *Anatomía humana*. 6a ed. España: Pearson, 2009. 906 p. ISBN: 978 – 84 – 832 – 2870 – 8.
6. MATARIC, Maja J. *The robotics primer*. Estados Unidos: Massachusetts, 2007. 306 p. ISBN: 978 – 0 – 262 – 63354 – 3

