



Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Centro Interdisciplinario de Posgrados,
Investigación y Consultoría

Maestría en Ingeniería Mecatrónica

Prótesis Mecatrónica Inteligente de Miembro Inferior

Tesis que para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería Mecatrónica
presenta

Soto García Emilio Miguel

Puebla, México.

Enero del 2008



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyla**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS.

A mis profesores que me han enseñado los conocimientos que ahora entiendo, y que me han hecho crecer hacia un sueño de generar tecnología que ayude a personas discapacitadas, a mi familia que si ellos no tendría aliento para seguir adelante y para mi madre que siempre esta pendiente de que no decaiga.

Gracias a todos, su amigo Emilio.

Capítulo Uno. Conceptos sobre la locomoción humana y las prótesis.

1.1 Locomoción humana normal.	1-1
1.2 Fases del caminar.	1-2
1.2.1 Subdivisión de la fase de apoyo.	1-3
1.2.2 Subdivisiones de la fase de balanceo.	1-4
1.3 Línea del centro de gravedad.	1-5
1.4 Métodos del estudio de la marcha.	1-7
1.4.1 Análisis cinemático de fuerzas de la marcha del tobillo.	1-9
1.4.2 Análisis cinético de fuerzas de la marcha del tobillo.	1-10
1.4.3 Análisis cinemático de fuerzas de la marcha de la rodilla.	1-12
1.4.4. Análisis cinético de fuerzas de la marcha de la rodilla.	1-14
1.5 Movimiento en el plano frontal.	1-16
1.6 Prótesis y componentes.	1-18
1.6.1 Unidad de rotación	1-19
1.6.2 Construcción modular	1-20
1.6.3 Prótesis hidráulicas.	1-23
1.6.4 Prótesis de alta tecnología.	1-26

Capítulo Dos. Conceptos Teóricos.

2.1 Modelo dinámico.	2-1
2.2 Teoría de control difuso.	2-9
2.3 Modelo difuso.	2-12
2.3.1 Identificación difusa.	2-14
2.3.2 Funciones difusas.	2-14
2.3.3 Inferencia difusa.	2-16
2.4 Engranajes.	2-18
2.4.1 Engranajes Satelitales.	2-21
2.4.2 Mecanismos de tornillo sin fin.	2-23
2.5 Electrónica.	2-30
2.5.1 Giroscopio.	2-30
2.5.2 Microcontrolador.	2-33

Capítulo Tres. Construcción del prototipo.

3.1 Sistema Mecánico.	3-1
3.2 Sistema electrónico.	3-5
3.3 Software.	3-8
3.4 Diseño del control borroso.	3-13
3.4.1 Fuzificación de las variables.	3-14
3.4.2 Reglas de inferencia.	3-22
3.4.3 Defuzificación.	3-23
3.5 Estabilidad difusa.	3-27

Capítulo Cuatro. Resultados, recomendaciones y conclusiones.

4.1 Resultados de la construcción de la mecánica.	4-1
4.2 Resultados de la construcción de la electrónica.	4-4
4.3 Conclusiones	4-6

LISTA DE TABLAS

Nombre.	Página.
Tabla 1. Conversión del sensor a decimal.	3-10
Tabla 2. Conversión en un rango de -10 a 10 grados.	3-11
Tabla 3. Conversión del rango de -10 a 10 grados en cada incremento digital.	3-13
Tabla 4. Estudio de las pendientes en las funciones de pertenencias.	3-15
Tabla 5. Localidades de memoria para las funciones de pertenencia de los grados.	3-18
Tabla 6. Estudio de las pendientes en las funciones de pertenencia de la velocidad de cambio de los grados.	3-20
Tabla 7. Reglas de inferencia encontradas.	3-23

LISTA DE FIGURAS

Capítulo Uno.

Nombre.

Página.

Figura 1.1. Fase de apoyo y balanceo.	1-2
Figura 1.2. Contacto de pies con el suelo.	1-2
Figura 1.3. Duración de ciclo de doble apoyo.	1-3
Figura 1.4. Locomoción de fases de apoyo contra ángulo de inclinación de la pierna.	1-4
Figura 1.5. Locomoción de fases de balanceo contra ángulo de inclinación de la pierna.	1-5
Figura 1.6. Movimiento del centro de gravedad.	1-6
Figura 1.7. Movimiento de la pelvis.	1-6
Figura 1.8. Fuerza inicial de la marcha con el suelo.	1-8
Figura 1.9. Análisis cinemático.	1-9
Figura 1.10. Análisis cinemático de fuerzas de la marcha del tobillo.	1-10
Figura 1.11. Análisis cinético de fuerzas de la marcha del tobillo.	1-12
Figura 1.12. Flexión del talón.	1-13
Figura 1.13. Análisis cinemático de fuerzas de la marcha del rodilla.	1-14
Figura 1.14. Fuerzas externas del análisis cinético de la marcha de la rodilla.	1-15
Figura 1.15. Fuerzas internas del análisis cinético de la marcha de la rodilla.	1-16
Figura 1.16. Movimiento de la cadera, ejerce fuerza sobre el apoyo de talón.	1-17
Figura 1.17. Suspensión y acople con paciente de prótesis.	1-19
Figura 1.18. Adaptadores	1-20
Figura 1.19. Partes modulares de las prótesis.	1-21
Figura 1.20. Prótesis hidráulicas.	1-26
Figura 1.21. Partes de prótesis de alta tecnología comercial.	1-27
Figura 1.22. Fuerzas de contrarrestar las fuerzas de cinemática en la pierna.	1-27

Capítulo Dos.

Nombre.

Página.

Figura 2.1. Estudio de fuerzas en la marcha.	2-2
Figura 2.2. Función borrosa de pertenencia.	2-11
Figura 2.3. Bloques de un diseño difuso.	2-12
Figura 2.4. Función de pertenencia trapezoidal.	2-15
Figura 2.5. Ejemplo de funciones de pertenencia de una variable.	2-15
Figura 2.6. Funciones de defuzzificación.	2-16
Figura 2.7. Partes de un engrane 1.	2-18
Figura 2.8. Partes de un engrane 2.	2-19
Figura 2.9. Partes de un engranes satelitales 1.	2-23
Figura 2.10. Funcionamiento de un engrane sin fin.	2-23
Figura 2.11. Giroscopio antiguo.	2-31
Figura 2.12. Giroscopio del proyecto.	2-32
Figura 2.13. Esquema de efecto hall.	2-32
Figura 2.14. Diagrama del funcionamiento del giroscopio.	2-33
Figura 2.15. Microcontrolador del proyecto.	2-34

Capítulo Tres.

Nombre.

Página.

Figura 3.1. Motor de DC.	3-1
Figura 3.2. Engrane planetario de la primera caja reductora.	3-2
Figura 3.3. Engranes satelitales de la primera caja reductora.	3-2
Figura 3.4. Engrane sin fin de la segunda caja reductora.	3-2
Figura 3.5. Engrane helicoidal de la segunda caja reductora.	3-3
Figura 3.6. Pie protésico.	3-4
Figura 3.7. Prototipo construido.	3-4
Figura 3.8. Esquema del circuito.	3-5
Figura 3.9. Señal PWM generada del microcontrolador.	3-6
Figura 3.10. Circuito impreso.	3-7
Figura 3.11. Partes de construcción del prototipo.	3-7
Figura 3.12. Baterías.	3-8
Figura 3.13. Señal PWM generada por el giroscopio.	3-8

Figura 3.14. Señal análoga generada por el servomotor.	3-9
Figura 3.15. Diagrama a bloques del control difuso.	3-13
Figura 3.16.Fuzzificación de grados.	3-14
Figura 3.17.Diagrama de flujo de la fuzzificación de grados.	3-17
Figura 3.18. Funciones de pertenencia para la velocidad de cambio de los grados.	3-19
Figura 3.19. Diagrama de flujo de las funciones de pertenencia de la velocidad de cambio de los grados.	3-21
Figura 3.20. Existencia de Q en el pulso PWM	3-22
Figura 3.21. Centroides.	3-23

Capítulo Cuatro.

Nombre.

Página.

Figura 4.1 Fuerza de palanca en la flecha del segundo reductor.	4-2
Figura 4.2. Unión de cajas reductoras	4-3
Figura 4.3. Tarjeta electrónica	4-4
Figura 4.4. Captación de señal por el microcontrolador	4-5

INTRODUCCIÓN.

El trabajo presentado es una investigación de diseño para el desarrollo de una prótesis mecatrónica que ayude a un paciente que ha sufrido la pérdida corporal de un miembro inferior proximal superior de la rodilla, el diseño se centra en la elaboración de un sistema que sea capaz de reaccionar a la marcha motriz, dando movilidad de flexión y extensión de la rodilla de acuerdo a la posición con la que el muñón del paciente se encuentre.

Con esta finalidad se busca dar solución a la problemática de que un paciente pueda acceder a un sistema de este tipo y no depender de prótesis fijas o que necesitan una fuerza externa para tener movilidad.

La finalidad de éste trabajo es proporcionar un prototipo capaz de reaccionar a la marcha, que sea inteligente en calcular la posición en el que se encuentra el muñón del paciente y reaccionar con dirección y duración de movimiento adecuados, siempre cuidando los límites del movimiento de la rodilla.

Tomando en cuenta lo anterior, el sistema presentado deberá ser posteriormente adaptado a un paciente, lo que repercutirá en algunas modificaciones de diseño como son la estructura, y tamaño de acuerdo al paciente, y adaptación de sensado mioeléctrico, pero tomando los principios y conclusiones de está investigación, que son en sí, la base para el desarrollo de prótesis de este tipo. Lo que esperamos con este trabajo es que pronto se pueda ayudar a un paciente que ha sufrido un trauma severo como es la pérdida de una extremidad y poder así, mejorar su calidad de vida.

El trabajo se ha elaborado de la siguiente forma:

1. Desarrollo teórico de los aspectos más importantes del prototipo.
2. Desarrollo práctico del prototipo.
3. Análisis y validaciones de los resultados, conclusiones, y recomendaciones para sus futuras implementaciones en pacientes.

Capítulo Uno.

Conceptos sobre la locomoción humana y las prótesis.

1.1 Locomoción humana normal.

El conocimiento de la locomoción humana normal del miembro inferior es la base del tratamiento sistemático y del manejo de la marcha, especialmente cuando se usan prótesis, es por eso que la locomoción humana normal se ha descrito como una serie de movimientos alternantes, rítmicos, de las extremidades y del tronco que determinan un desplazamiento hacia delante del centro de gravedad. Aunque existen pequeñas diferencias en la forma de la marcha de un individuo a otro, estas diferencias caen dentro de pequeños límites. El ciclo de la marcha comienza cuando el pie contacta con el suelo y termina con el contacto con el suelo del mismo pie.

1.2 Fases del caminar.

Los dos mayores componentes del ciclo de la marcha son: la fase de apoyo y la fase de balanceo (figura 1.1). Una pierna está en fase de apoyo cuando está en contacto con el suelo y está en fase de balanceo cuando no contacta con el suelo.

La cantidad relativa de tiempo gastado durante cada fase del ciclo de la marcha, a una velocidad normal, es:

1. Fase de apoyo: 60% del ciclo
2. Fase de balanceo: 40% del ciclo
3. Doble apoyo: 20% del ciclo.

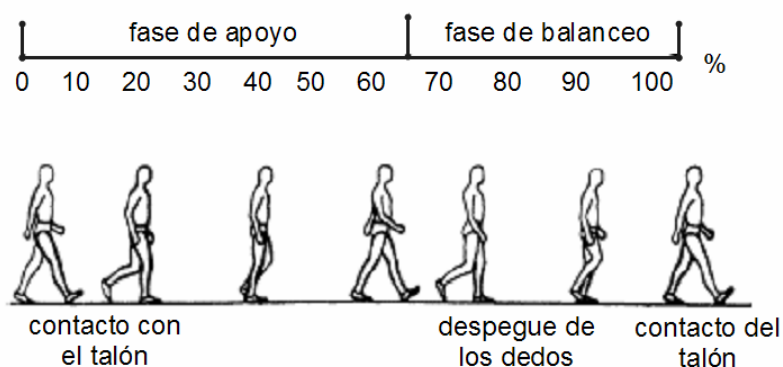


Figura 1.1. Fase de apoyo y balanceo.

La longitud del paso completo es la distancia lineal entre los sucesivos puntos de contacto del talón del mismo pie. Longitud del paso es la distancia lineal en el plano de progresión entre los puntos de contacto de un pie y el otro pie (figura 1.2).

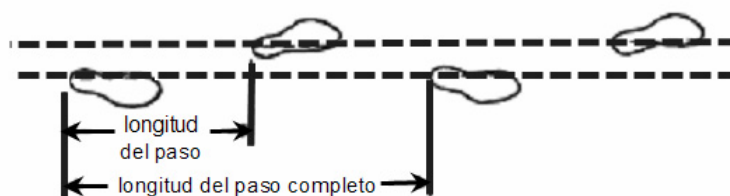


Figura 1.2. Contacto de pies con el suelo.

Se dice en conceptos médicos que existe un apoyo sencillo, cuando sólo una pierna está en contacto con el suelo. El período de doble apoyo ocurre cuando ambos pies están en contacto con el suelo simultáneamente. Esto lo denotamos ya que el pie significa que por un corto período de tiempo, la primera parte de la fase de apoyo de una pierna tiene doble apoyo con la última parte de la fase de apoyo de la contra pierna (figura 1.3). La ausencia de este pequeño período de doble apoyo distingue el correr del andar. Con el aumento de la velocidad de la marcha hay un aumento relativo en el tiempo de fase de balanceo, y disminución

del tiempo usado en la fase de apoyo, por consecuencia la duración del tiempo del doble apoyo es muy pequeña o no existe conforme aumenta la velocidad de la marcha.

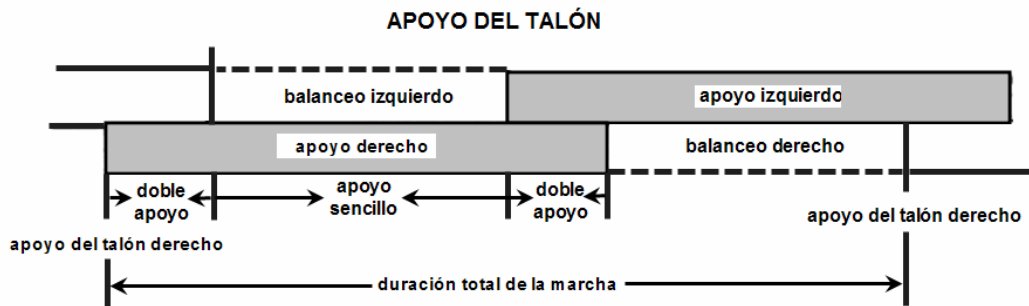


Figura 1.3. Duración de ciclo de doble apoyo.

1.2.1 Subdivisión de la fase de apoyo.

Hay cinco momentos que son útiles al subdividir la fase de apoyo:

1. Contacto del talón. Se refiere al instante en que el talón de la pierna de referencia toca el suelo.
2. Apoyo plantar. Se refiere al contacto de la parte anterior del pie con el suelo.
3. Apoyo medio. Ocurre cuando el trocánter mayor está alineado verticalmente con el centro del pie, visto desde un plano sagital.
4. Elevación del talón. Ocurre cuando el talón se eleva del suelo, y el despegue del pie ocurre cuando los dedos se elevan del suelo.
5. Despegue del pie. Sucede cuando el pie a dejado de tocar el piso.

La fase de apoyo puede también dividirse en intervalos con los términos de aceptación del peso, apoyo medio y despegue, sin embargo el movimiento de la rodilla que es lo que nos interesa en este trabajo, es controlado por el muslo, tiene un ángulo de inclinación hacia delante al iniciar la fase de apoyo, y termina en un ángulo posterior al terminar la fase, nos fijaremos desde este punto en la importancia de esta característica ya que la prótesis tiene su fundamentación en

este principio, no dejando a un lado que esto debe coincidir con la teoría de locomoción humana que usualmente es utilizada por lo médicos (figura 1.4).

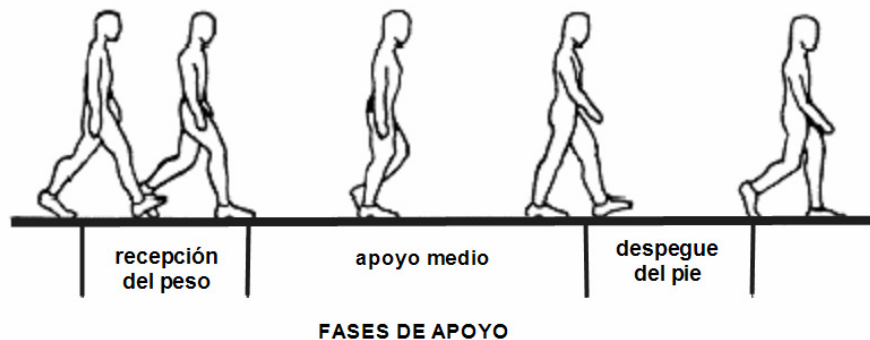


Figura 1.4. Locomoción de fases de apoyo contra ángulo de inclinación de la pierna.

La evaluación clínica de la marcha es suficiente generalmente con la estimación visual de la posición del trocánter mayor.

1.2.2 Subdivisiones de la fase de balanceo.

La fase de balanceo puede dividirse en tres intervalos designados con los términos de aceleración, balanceo medio y desaceleración. Cada una de estas subdivisiones constituye aproximadamente un tercio de la fase de balanceo.

1. Período de aceleración. Se caracteriza por la rápida aceleración del extremo de la pierna inmediatamente después de que los dedos dejan el suelo.
2. Balanceo medio. Sucede cuando la pierna balanceada pasa a la otra pierna, moviéndose hacia delante de la misma, ya que está en fase de apoyo.
3. Periodo de desaceleración. Es cuando la pierna que se mueve rápidamente cuando se acerca al final del intervalo.

En esta subdivisión de la fase de balanceo se denota también un cambio del ángulo de inclinación determinado por el muslo, este ángulo se mueve a mayor velocidad en esta fase de un ángulo ahora de atrás hacia adelante, por lo que el sistema deberá ser capaz de captar cuanto tiempo deberá mover la rodilla para compensar dicho cambio de velocidad y estar listo para dar inicio de nuevo a la fase de apoyo, recordemos que se quiere diseñar un sistema que a partir de un muñón arriba de rodilla sea capaz de asemejar la locomoción natural de la marcha humana.

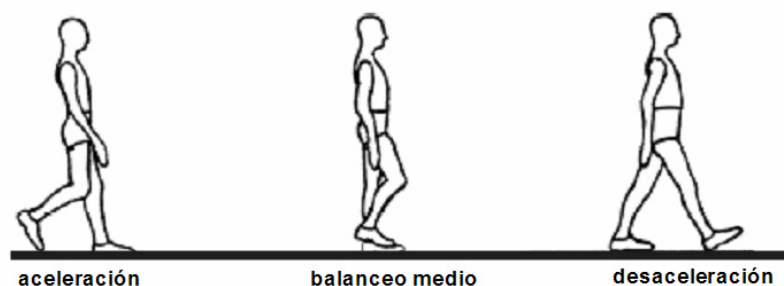


Figura 1.5. Locomoción de fases de balanceo contra ángulo de inclinación de la pierna.

1.3 Línea del centro de gravedad.

Las leyes de la mecánica dicen claramente que el mínimo gasto de energía se consigue cuando un cuerpo se mueve en línea recta, sin que el centro de gravedad se desvíe, tanto para arriba como para abajo, como de un lado a otro. Esta línea recta sería posible en la marcha normal si las extremidades inferiores terminaran exactamente a la misma altura y tuviéramos rigidez en la postura vertical, cómo esto no es lo que ocurre, el centro de gravedad del cuerpo se desvía de una línea recta, pero para la conservación de la energía, la desviación o desplazamiento debe quedarse a un nivel óptimo.

En la marcha normal el centro de gravedad se mueve hacia arriba y hacia abajo, de manera rítmica, conforme se camina hacia adelante. El punto más alto se produce cuando la extremidad que carga el peso, está en el centro de su fase de

apoyo; el punto más bajo ocurre en el momento del apoyo doble, cuando ambos pies están en contacto con el suelo. El punto medio de este desplazamiento vertical en el adulto masculino es aproximadamente de 5 cm. La línea Seguida por el centro de gravedad es muy suave sin cambios bruscos de desviación.

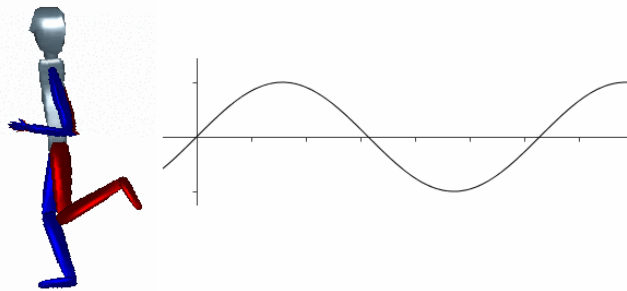


Figura 1.6. Movimiento del centro de gravedad.

Cuando el peso se transfiere de una pierna a otra, hay una desviación de la pelvis y del tronco hacia el lado o extremidad en la que se apoya el peso del cuerpo. El centro de gravedad, al tiempo que se desplaza hacia adelante no sólo sufre un movimiento rítmico hacia arriba y abajo, sino que también oscila de un lado a otro. El desplazamiento total de este movimiento lateral es también aproximadamente de 5 cm. El límite de los movimientos laterales del centro de gravedad ocurre cuando cada extremidad está en el apoyo medio y la línea del centro de gravedad es también en este caso, de curvas muy suaves.

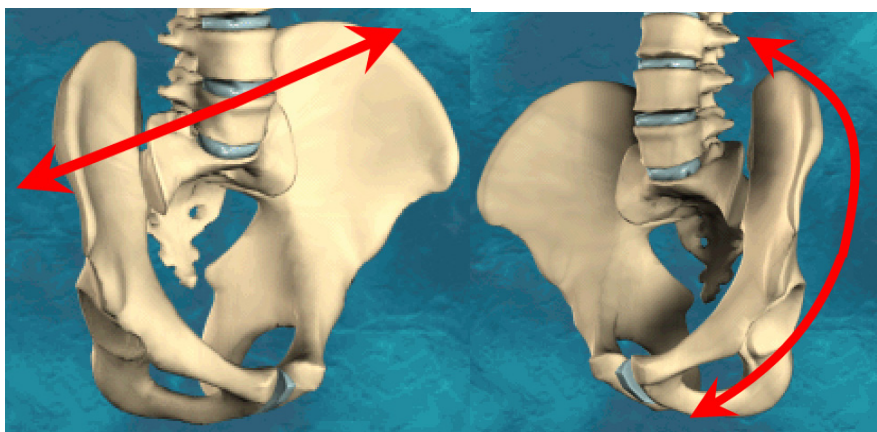


Figura 1.7. Movimiento de la pelvis.

Estas características de la marcha que influyen en la línea del centro de gravedad, es muy importante denotarlas, ya que el sistema diseñado deberá tener su propio centro de gravedad y además ser lo suficientemente fuerte para resistir la palanca lateral ejercida a la prótesis.

1.4 Métodos del estudio de la marcha.

Los investigadores de la locomoción humana han estudiado dos métodos de investigación. Uno es la cinemática que describe los movimientos del cuerpo en conjunto y los movimientos relativos de las partes del cuerpo durante las diferentes fases de la marcha. Un ejemplo de esto es el estudio de las relaciones angulares de los segmentos de la extremidad inferior durante el ciclo de la marcha. El otro es del área de la cinética que se refiere a las fuerzas que producen el movimiento. Las fuerzas de mayor influencia en los movimientos del cuerpo en la marcha normal, son aquellas debidas ha:

1. Gravedad
2. Contracción muscular
3. Inercia
4. Reacciones del suelo (resultantes de las fuerzas que ejerce el suelo).

Fuerzas que son muy importantes tomar en cuenta para realizar nuestro modelo dinámico, ya que esto nos llevara a determinar si la construcción de un sistema puede ser viable, es decir existe un rango de estabilidad en el que el diseño mecánico y el control puede coexistir en un punto de equilibrio.

La figura 1.8 ilustra la influencia de varias fuerzas en la marcha. La fuerza que el pie ejerce en el suelo debido a la gravedad y a la inercia está en oposición con la reacción del suelo (F_{RS}).

Como indica la figura, en la marcha normal los componentes de fuerzas naturales generadas verticalmente y horizontalmente, estas fuerzas pasa al eje de la rodilla, ello da como resultante la flexión de la rodilla si no se aplicara ninguna restricción al paso que desee el paciente. Esta fuerza se ejerce por el cuadriceps, de manera que la rodilla no se colapsa, pero se flexiona de forma controlada. Una forma de controlar este tipo de situaciones es el dar mayor ángulo de inclinación al los músculos de la pierna de tal forma que el sistema reaccione y mueva la rodilla o de lo contrario permanezca fija.

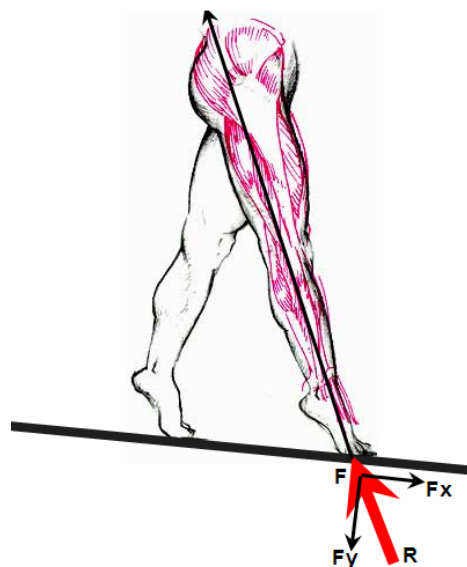


Figura 1.8. Fuerza inicial de la marcha con el suelo.

El siguiente análisis de la marcha normal se deriva de la cinemática y la cinética y de estudios electromiográficos de sujetos normales andando a una cadencia normal (100 a 115 pasos por minuto), lo que dará un análisis de los valores de los ángulos de la articulación, producido por las fuerzas generadas externamente y por la actividad muscular.

Las acciones del tobillo y rodilla, se discuten separadamente, en términos de factores de cinemática y cinética. La discusión de los factores cinéticos se refiere a las fuerzas creadas externa e internamente. Por último, se presenta una breve discusión del análisis del movimiento tanto cinemática como cinético, de tal forma

que podamos comprender con certeza las variables involucradas en el sistema, y como poder atacar el diseño para aproximarnos al movimiento de la rodilla.

1.4.1 Análisis cinemático de fuerzas de la marcha del tobillo.

Entre la elevación del pie y el punto medio del balanceo, el pie se mueve de una posición inicial de flexión plantar al desprenderse del suelo a una posición esencialmente neutral, que se mantiene por el resto de la fase de balanceo. La causa del movimiento inicial de la posición neutral del pie es por acción de los músculos tibiales anteriores.

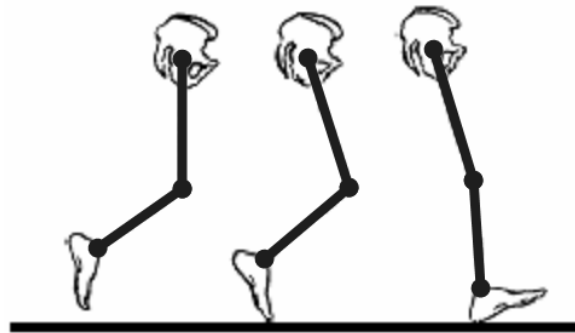


Figura 1.9. Análisis cinemático.

En el apoyo medio, la dorsiflexión aumenta rápidamente desde una posición de unos 5 grados de dorsiflexión en el apoyo medio.

Al despegue del talón cuando el tacón del zapato deja el suelo la articulación del tobillo está aproximadamente en 15 grados de dorsiflexión.

En el intervalo de elevación del talón y el despegue del pie.

La relación angular entre la tibia y el pie son casi completamente opuestas. De 15 grados de dorsiflexión al despegue del talón, el tobillo se mueve hasta unos 35 grados, con lo que al despegue del pie la articulación está en unos 20 grados de flexión plantar.

En el momento del contacto del talón.

El juego del tobillo está en posición neutra, a medio camino entre la dorsiflexión y la flexión plantar.

Simultáneamente con el contacto del talón.

La articulación del tobillo empieza a moverse en dirección a la flexión plantar.

En el tiempo en que la planta del pie está en contacto con el suelo.

La articulación del tobillo va de la posición neutral a los 15 grados de flexión plantar.

Cuando la planta del pie está plana en el suelo.

La tibia y otros segmentos de la pierna que apoya empieza a rotar hacia adelante sobre el pie fijo.

En la fase media.

La articulación del tobillo está en 5 grados aproximadamente de dorsiflexión.

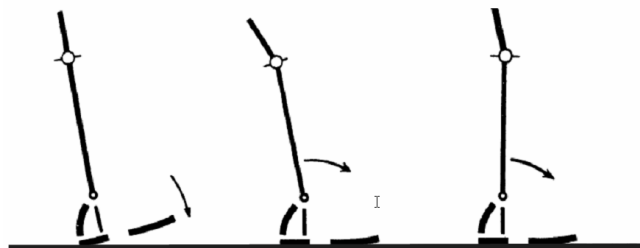


Figura 1.10. Análisis cinemático de fuerzas de la marcha del tobillo.

1.4.2 Análisis cinético de fuerzas de la marcha del tobillo.

a) Fuerzas externas.

Contacto del talón.

Por un breve período de tiempo la resultante de las fuerzas de reacción del suelo está por delante de la articulación del tobillo. De acuerdo con ello, un momento de fuerza de pequeña magnitud (1Kg.) tiende a mover la articulación del tobillo en dirección a la dorsiflexión. Esta tendencia que no mueve la articulación del tobillo, se produce por descenso del talón al suelo en el momento de apoyo del talón.

Inmediatamente después del contacto del talón.

A medida que se transmite un mayor peso del cuerpo a la extremidad, el rápido aumento de la fuerza vertical hace que la resultante pase por detrás de la articulación, generando un momento de fuerza en dirección a la flexión plantar.

Poco después de que la planta del pie esté plana en el suelo.

Se ha alcanzado el máximo momento de flexión plantar (aproximadamente 20 ft.-lb.). Después la reacción resultante del suelo se mueve de nuevo hacia delante de la articulación del tobillo y crea un momento de fuerza en la dirección de dorsiflexión. Este momento corresponde a la fuerza generada al rotar la tibia sobre el pie fijo.

En el apoyo medio.

Ahora el momento de fuerza en dirección de dorsiflexión es aproximadamente 25 ft.-lb.

b) Fuerzas internas.

En el instante del contacto del talón.

Los tres dorsiflexores primarios del tobillo están activos, con el extensor largo de los dedos y el extensor largo del dedo gordo, con mayor actividad que el tibial anterior.

A continuación del contacto del talón.

El grupo pretibial produce una contracción excéntrica para suministrar suficiente fuerza para evitar que el antepié golpee contra el suelo cuando las fuerzas externas, debido a la gravedad y a la inercia, llevan el pie a flexión plantar.

Después de que la planta del pie está plana en el suelo.

La tibia empieza a rotar hacia adelante sobre el pie fijo, los dorsiflexores están esencialmente inactivos y los músculos de la pantorrilla (el gastronemio, soleo, tibial posterior, flexor largo de los dedos y peroneo lateral largo) demuestran un aumento gradual de su actividad. Para la mayor parte de ellos su actividad continúa aumentando por encima del punto de apoyo medio y sirve para controlar la velocidad con que la tibia rota sobre el pie fijo.

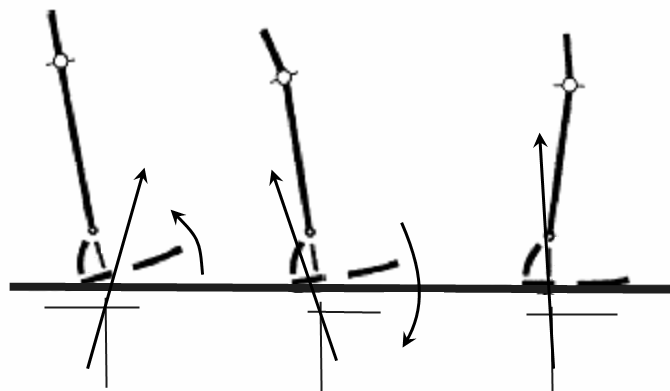


Figura 1.11. Análisis cinético de fuerzas de la marcha del tobillo.

1.4.3 Análisis cinemático de fuerzas de la marcha de la rodilla.

Entre el despegue del pie y la parte media del balanceo. La rodilla se flexiona de una posición inicial aproximada de 40 grados a un ángulo de máxima flexión, de aproximadamente 65 grados. La acción de los cuádriceps ayuda a prevenir una

elevación excesiva del tacón y también contribuye a una aceleración hacia delante de la pierna.

Inmediatamente después del contacto del talón, empieza la flexión de la rodilla y continúa durante la primera parte de la fase de apoyo hasta aproximadamente los 20 grados de flexión. Esta característica de la marcha normal ayuda a suavizar la línea del centro de gravedad y reduce su desplazamiento hacia arriba cuando el cuerpo se mueve apoyado sobre el pie en que se apoya.

En el apoyo medio.

La articulación de la rodilla está en unos 10 grados de flexión, moviéndose hacia la extensión.

Inmediatamente antes de que el talón pierda contacto con el suelo.

La rodilla tiene 4 grados de extensión completa.

Entre el despegue del talón y el de los dedos.

La articulación de la rodilla se mueve de casi una completa extensión a unos 40 grados de flexión.



Figura 1.12. Flexión del talón.

Inmediatamente antes de que el talón contacte con el suelo.

La articulación de la rodilla está en extensión completa.

Simultáneamente con el contacto del talón.

La articulación empieza a flexionar y continúa flexionando hasta que la planta del pie está plana en el suelo.

Inmediatamente después de haber alcanzado la posición plana del pie.

La rodilla está aproximadamente a 20 grados de flexión y empieza a moverse en dirección de extensión.

En el apoyo medio.

La rodilla está aproximadamente a 10 grados de flexión y continúa moviéndose hacia la extensión.

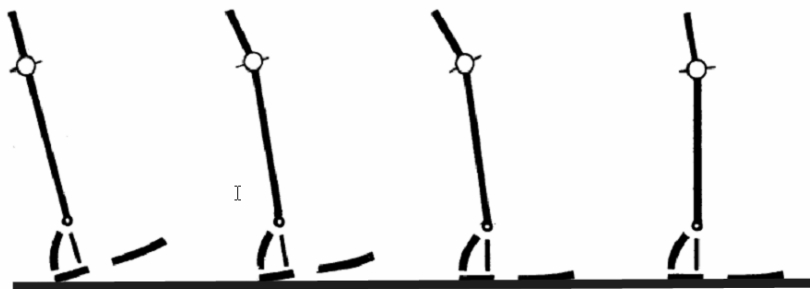


Figura 1.13. Análisis cinemático de fuerzas de la marcha de la rodilla.

1.4.4. Análisis cinético de fuerzas de la marcha de la rodilla.

a) Fuerzas externas.

Inmediatamente después del contacto del talón.

El talón empieza a empujar hacia adelante contra el suelo. El peso corporal apoyado sobre la pierna empieza a aumentar rápidamente. La resultante de las fuerzas verticales y anteriores pasa por detrás de la rodilla, produciendo un momento de flexión de, aproximadamente, 10 ft.-lb.

Entre el pie apoyado completamente y el apoyo medio.

La magnitud de este momento mecánico que flexiona la rodilla alcanza un valor máximo de, aproximadamente, 30 ft.-lb.



Figura 1.14. Fuerzas externas del análisis cinético de la marcha de la rodilla.

b) Fuerzas internas.

Al contacto del talón.

El cuádriceps se va alargando por una contracción excéntrica para controlar la articulación de la rodilla, conforme se mueve de una extensión completa a una posición de 15 ó 20 grados de flexión.

Inmediatamente después que el pie está plano en el suelo.

La naturaleza de la actividad del cuádriceps cambia de una contracción excéntrica (alargamiento) a una contracción concéntrica (acortamiento).

Entre el pie plano en el suelo y el apoyo medio.

El cuádriceps actúa extendiendo el muslo en la pierna, la rodilla flexionada se mueve en la dirección de la extensión, como resultado de una contracción concéntrica del cuádriceps y de una aceleración hacia delante del centro de gravedad, producido por el despegue del miembro opuesto.



Figura 1.15. Fuerzas internas del análisis cinético de la marcha de la rodilla.

1.5 Movimiento en el plano frontal

Los movimientos angulares de la pierna, vistos en el plano frontal, son mucho más pequeños que los observados en el plano sagital. Al contacto del talón, el pie está en ligera inversión. Inmediatamente después del contacto del talón, la reacción del suelo pasa ligeramente lateral al eje subtalar y el pie rota en ligera eversión cuando la parte anterior del pie contacta el suelo. Durante el intervalo de la fase media de apoyo, la parte posterior del pie se mueve desde una posición de 5 grados de eversión a una posición de ligera inversión, que continúa durante el despegue del suelo. La inversión de la parte posterior del pie resulta de la acción combinada del tríceps sural y la rotación externa de la tibia con respecto al pie, durante el intervalo de despegue.

El movimiento de la rodilla en el plano frontal es mínimo durante la fase de apoyo. Hay cierta tendencia hacia una ligera abducción de la tibia al contacto del talón, pero inmediatamente después la reacción del suelo tiende a producir adducción de la tibia. Durante la primera parte de la fase de apoyo, la pelvis cae unos 5 grados de la horizontal en el lado opuesto, conforme esta pierna empieza su fase de balanceo. La caída de la pelvis está limitada por la acción de los músculos abductores de la cadera de la pierna en fase de apoyo.

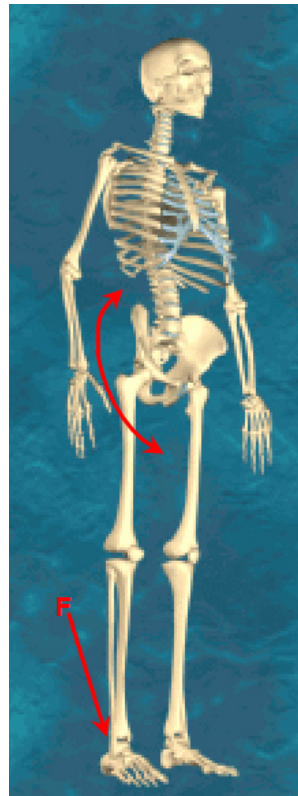


Figura 1.16. Movimiento de la cadera, ejerce fuerza sobre el apoyo de talón.

Por lo estudiado, podemos apreciar que el sistema mecánico de la rodilla, deberá ser capaz de moverse armónicamente con el movimiento de toda la pierna, por lo que se vuelve importante el análisis por medio de un modelo dinámico a partir de la cinemática, aunado a esto el sistema debe ser lo suficientemente fuerte en torque para que pueda resistir todas la fuerzas vistas en la cinética del movimiento en la locomoción.

Es por ello que a continuación estudiaremos un método que nos ayuda a comprender la dinámica y la inercia del sistema, y observar puntos de equilibrio en el sistema, y encontrar cierta estabilidad, que sea capaz de ser controlada por medio de un microcontrolador, una vez terminado este proceso, daremos pauta al diseño mecánico capaz de resistir la cinética de la locomoción humana.

1.6 Prótesis y componentes.

Estudiemos primero los componentes de una prótesis, ya que algunos conceptos y partes empleadas en dichas prótesis son reutilizables en prótesis.

El corselete de muslo está sujeto al encaje y a la pierna por medio de dos barras laterales con articulación en la rodilla. Además de mantener la prótesis en la pierna durante la fase de balanceo, el corselete recibe parte del peso del cuerpo y ayuda a la estabilidad durante la fase de apoyo. En algunos casos, se ayuda a mantener la suspensión por medio de un cinturón flexible y unos tirantes. Los tirantes se sujetan a la pantorrilla de la prótesis y, por una correa elástica, al cinturón. La correa elástica tira hacia arriba de la prótesis y ayuda a la suspensión y además, cuando la rodilla está flexionada, la correa elástica se estira y la tensión ayuda a la extensión que se extiende desde la cara posterior del corselete del muslo a la pantorrilla que controla la extensión total de la rodilla, evitando que los topes metálicos de la articulación de la rodilla entren en contacto de forma brusca y causando ruidos.

En vista de que la articulación de la rodilla humana no es una articulación simple de un solo eje, se producen movimientos entre la prótesis y el miembro cuando se usen las articulaciones mecánicas de eje sencillo.

Este movimiento relativo puede causar rozaduras, irritaciones y presiones en el muñón. Otras desventajas del corselete de muslo son que abulta, que aumenta el peso de la prótesis, que su efecto-de constricción puede producir atrofia en el muslo y que puede aumentar el edema que puede haber en el miembro amputado.

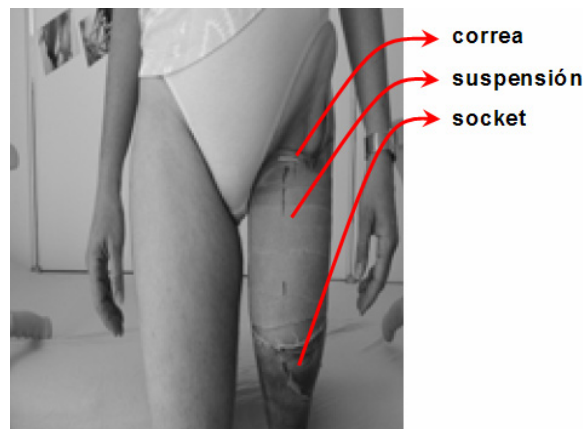


Figura 1.17. Suspensión y acople con paciente de prótesis.

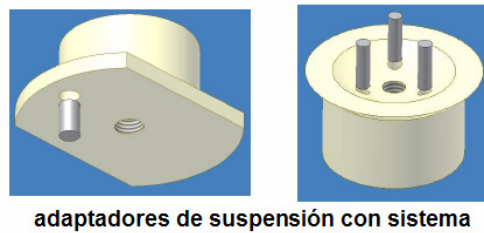
1.6.1 Unidad de rotación

Cuando el amputado camina, el encaje tiende a girar en el miembro amputado, produciendo un efecto de roce en la superficie de contacto encaje muñón. Algunas de las fuerzas de torsión las absorbe el conjunto pie-tobillo, y el momento de torsión residual no es un problema. En otros casos, en particular con amputados activos, el momento aplicado al muñón es fuente de incomodidades.

Para solucionar este problema se ha desarrollado un mecanismo rotatorio de absorción del momento de fuerza para usarlo en prótesis de extremidad inferior. No está indicado, en general, para amputados por debajo de la rodilla con prótesis PT3 con forma supracondilea de suspensión, pero puede ser útil en un amputado por debajo de la rodilla que lleva un corselete de muslo que le cause molestias.

La unidad rotatoria se interpone entre el extremo inferior de la pantorrilla y el conjunto pie-tobillo. Por medio de un elemento resistente que se incorpora entre las partes superior e inferior de la unidad se produce la rotación de la pantorrilla mientras el pie está en contacto con el suelo. Hay diferentes modelos para usarlos con prótesis de construcción exoesquelética o endoesquelética. La figura 16, muestra una unidad instalada en una prótesis por debajo de la rodilla.

Figura 1.18.



1.6.2 Construcción modular

El concepto básico del diseño modular de las prótesis lleva consigo la utilización de componentes intercambiables standardizados que pueden unirse para construir una prótesis según las necesidades de los amputados. Existen varios sistemas modulares. Aunque hay diferencias en estos sistemas, también hay ciertas partes básicas similares:

1. La utilización de una pieza tubular estructural que constituye el esqueleto interno, y al que se puede sujetar fácilmente las piezas de pie tobillo y rodilla, y el encaje.
2. Una cubierta de material blando sobre la estructura esquelética que da una apariencia natural.
3. Incorporación de piezas para modificar la alineación de la prótesis.

Cuando se ha completado el proceso de alineación y fijación, se quita el exceso de madera que sirve para conectar el encaje y la pieza tubular. Se monta una cubierta cosmética blanda sobre el encaje y la pierna endoesquelética, y se da forma a la cubierta cosmética para conseguir una buena estética.

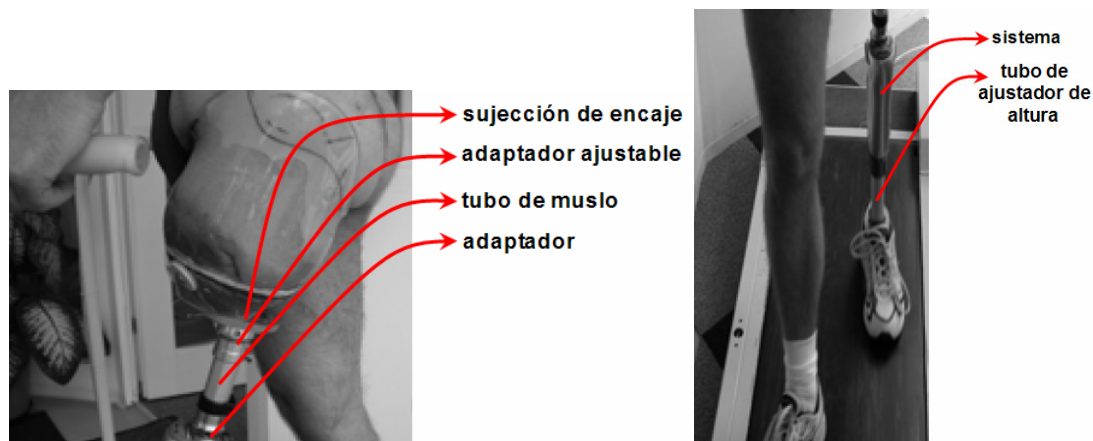


Figura 1.19. Partes modulares de las prótesis.

Cuando tenemos una prótesis por arriba de rodilla debemos estructurar las partes y analizarlas. El conjunto pie pierna, tobillo, piezas de articulación de la rodilla, pieza del muslo, encaje y sistema de suspensión.

Actualmente las piezas de la rodilla que más se usan son de madera o plástico, y de tipo extranjero que son mecánicas automáticas, electromecánicas e hidráulicas con el eje de la rodilla dentro de dicha pieza, con un sistema de fricción y el tope a la extensión.

La parte superior del bloque de la rodilla está conectada al extremo inferior del encaje en una determinada posición conseguida durante el proceso de alineación. El conjunto de la rodilla está sujeto a la pierna por dos articulaciones metálicas. El eje de la rodilla permite que la rodilla se flexione, y el tope a la extensión, que está dentro del mecanismo, limita la hiperextensión.

El conjunto de la rodilla consigue dar estabilidad a la misma durante la primera parte y la parte media de la fase de apoyo, pero también debe doblarse durante la última parte de la fase de apoyo y durante la fase de balanceo, así como al sentarse y arrodillarse. Debe ser duradero, contribuir a la comodidad del amputado y tener una apariencia aceptable.

La estabilidad de la rodilla protésica durante la carga puede obtenerse por uno o varios de los siguientes métodos:

1. Se puede mantener la rodilla estable en el momento del apoyo del talón y cuando el paciente está de pie, haciendo fuerza hacia atrás con el muñón dentro del encaje.
2. La prótesis debe estar alineada, de forma que el eje de la rodilla esté colocado posteriormente a la línea de carga.
3. Se puede incorporar a la rodilla un mecanismo de cierre o uno de freno, para evitar flexiones intempestivas.

Para parecerse a la marcha normal, la rodilla protésica debe ser capaz de flexionarse durante la fase de balanceo de la marcha. La flexión y extensión de la rodilla se lleva a cabo por movimientos del muñón, y además por los efectos que producen los momentos de fuerza y gravedad. A la rodilla protésica se le pueden añadir componentes que ayuden a controlar la fase de balanceo.

Para que el amputado pueda cargar el peso del cuerpo sin que se le estropee la rodilla protésica, debe ser un mecanismo relativamente sencillo.

La pieza de rodilla con eje sencillo hoy día es el tipo más utilizado. Otro tipo que se usa es el de ejes policéntricos. Eje sencillo ó hico. En este tipo de rodilla, la flexión y la extensión se hacen alrededor de un solo eje. En aparato de fricción, con o sin ayuda a la extensión, puede ayudar a controlar el movimiento de la pierna. La tendencia de la rodilla a colapsarse al cargar el peso del cuerpo, se controla por medio de la potencia muscular (fuerte extensión de la articulación de la cadera) y por la alineación. Las ventajas de la rodilla con eje único son su simplicidad (pocas partes móviles), mínimo ruido y un moderado costo de mantenimiento.

Existen métodos ya automáticos que ayudan al movimiento de la rodilla, sin embargo los sistemas son muy caros y poco soportados en su mantenimiento especializado, sin embargo se muestran a continuación los sistemas.

1.6.3 Prótesis hidráulicas.

En un esfuerzo para superar desventajas de prótesis fijas o de diseños basados en el deslizamiento se han desarrollado las prótesis de control hidráulico, por la característica de que el aceite es más denso y viscoso, las rodillas hidráulicas ofrecen una resistencia mayor a la cinética, inclusive que las neumáticas, y mucho mayor que la que se obtiene con los componentes convencionales.

El control hidráulico no depende de la fricción creada por dos superficies sólidas, que se deslizan una sobre la otra, sino de la resistencia que encuentra el fluido cuando se fuerza a través de pequeñas aberturas. Este tipo de resistencia permite que las características de balanceo se parezcan más a las de la marcha normal.

Las unidades de control hidráulico se diseñan para conseguir un movimiento variable y dependiente de la cadencia de la marcha, con gran resistencia en el comienzo y final del balanceo, y menor durante la fase media. Además, la cadencia que se ha seleccionado se mantiene permanente, ya que estas unidades de control están herméticamente cerradas.

Por otro lado, a causa de su complejidad, las averías son siempre un problema. Este capítulo describe las características más importantes de los aparatos de control hidráulico, disponibles en el mercado.

En el mecanismo hidráulico típico, el aceite se forzaba por medio de un pistón a través de un circuito. La resistencia hidráulica dependía del tipo de aceite, de la velocidad del flujo en relación con la velocidad del balanceo de la pierna, y las características de los canales de cada modelo, y así la resistencia variaba a través del balanceo. Esto simula la actividad de la marcha normal, en la cual los músculos actúan de manera coordinada para resistir la elevación de la pierna hacia atrás, al principio del balanceo, y frenar la pierna al final del mismo, con un momento primario que influye en la fase media del balanceo. El diseñador selecciona la longitud de los canales y su configuración, así como el fluido que debe usarse. El clínico regula la resistencia a la flexión y extensión, mientras el amputado controla la velocidad de la marcha con la cadencia seleccionada, con lo que automáticamente se produce la resistencia adecuada.

Todos los mecanismos de control tienen una ayuda a la extensión bastante similar a las articulaciones de rodilla convencionales. En las unidades hidráulicas se realiza a través de un mecanismo de muelle, que automáticamente ejerce una fuerza de extensión durante las primeras fases de la flexión de la rodilla. Esta ayuda a la extensión cuando se dan pasos cortos o cuando se anda en un espacio reducido, y evita que el amputado tenga que extender la cadera en cada paso.

Aunque prácticamente todas las prótesis de control hidráulico funcionan igual durante la fase de balanceo, hay algunos diseños que requieren una explicación aparte: Movimiento coordinado de rodilla-tobillo.

La mayoría de las unidades de control fluido consisten solamente en un mecanismo de rodilla, y se pueden usar con diferentes tipos de pie-tobillo, de encaje y de sistema de suspensión. Una de las unidades, sin embargo, es un elaborado sistema endoesquelético, que comprende una rodilla de un solo eje, pierna, cubierta cosmética y conjunto pie-tobillo.

Aunque las características de la fase de balanceo son las mismas que las explicadas antes, hay un movimiento coordinado rodilla-tobillo. Cuando la rodilla protésica se flexiona alrededor de 20°, el sistema hidráulico flexiona dorsalmente el pie, sin tocar el suelo durante el balanceo, mientras que el apoyo del talón produce una rápida flexión plantar del pie, aumentando la estabilidad de la rodilla. También aumenta la estabilidad al arrodillarse, ya que el tobillo puede realizar una gran flexión plantar.

Sin embargo, el arrodillarse frecuentemente tiende a dañar la funda cosmética. Esta unidad se puede adaptar a zapatos de tacones de alturas diferentes, hasta 5 cm. El pie se coloca normalmente en el grado necesario de flexión plantar por un mecanismo de unión. Sin embargo, no se puede alterar la resistencia a la dorsiflexión plantar.

Igual que con una rodilla mecánica, el amputado con un aparato de control hidráulico depende de la extensión activa de la cadera, de la alineación protésica correcta y de un buen ajuste del montaje pie-tobillo, para la estabilidad de la rodilla durante la carga. Hay una unidad que utiliza un potencial de resistencia extremadamente alto para proporcionar control de la fase de balanceo y de apoyo. Existen tres modos distintos para que la operación sea posible: 1) balanceo y control de apoyo (resistencia programada durante ambas partes del ciclo de marcha), 2) fase de control de balanceo solamente (el control de apoyo no puede utilizarse en todas las actividades), y 3) cierre de flexión de la rodilla (la rodilla no puede flexionarse).



- Control y ajuste óptimo.
- Optimiza el control del paciente sobre la prótesis.
- Estabilidad de la Rodilla Ajustable.
- Facilita la acción del deslizamiento.
- Variedad de accesorios.
- Buen sistema de control neumático.
- Soporta un peso de 300lbs.
- Extensión ajustable.

Figura 1.20. Prótesis hidráulicas.

Cuando se activa el control de la fase de apoyo, la unidad proporciona una suave acción de flexión que permite al amputado soportarse a sí mismo sobre la prótesis, durante un breve período de tiempo, sin necesidad de un cierre o una extensión activa de la cadera. Este dispositivo permite al amputado recuperar el equilibrio cuando tropieza o baja cuestas y escaleras de una manera normal, escalón por escalón.

1.6.4 Prótesis de alta tecnología.

Las prótesis más comerciales con estas características son las diseñadas por una empresa alemana que diseña sistemas inteligentes con características muy similares a este trabajo, como son códigos de programación que son capaces de controlar el movimiento de la rodilla por software basado en redes neuronales o diseño de controladores adaptivos, la idea general es regular la marcha según el paciente lo requiera, y reaccionan automáticamente a el movimiento de la marcha.

El concepto de este trabajo es precisamente diseñar un sistema que pueda competir con estos diseños pero con un sistema que sea más sencillo de dar mantenimiento y con un control de la prótesis inteligente capaz de regular también la marcha del paciente.

A continuación se presentan los sistemas de las prótesis comerciales.



Figura 1.21. Partes de prótesis de alta tecnología comercial.

Una de las características que se deben denotar de este tipo de prótesis es la capacidad de fuerza para contrarrestar las fuerzas involucradas, para tomarlas en cuenta en el diseño del prototipo, la imagen siguiente muestra las fuerzas que son estandarizadas en este tipo de productos.



Figura 1.22. Fuerzas de contrarrestar las fuerzas de cinemática en la pierna.

Capítulo Dos.

Conceptos Teóricos.

2.1 Modelo dinámico.

Conforme a lo que acabamos de estudiar, la locomoción humana tiene una explicación con la cinemática, por lo que haremos un modelo dinámico del sistema a desarrollar a partir de la cinemática directa de una pierna, tomando dos grados de libertad en el movimiento de la cadera y el otro propiamente en el movimiento generado por la rodilla, de tal forma que nos ayude a entender cuales son las inercias del movimiento y si el sistema puede llegar a ser controlable a partir de este análisis. El análisis de la locomoción con respecto a la cinética, se resolverá por medio de sistemas mecánicos con un juego de engranes satelitales, sin-fin y un engrane helicoidal, lo que provoca que el movimiento sea en un solo sentido, este es conveniente ya que lo que se quiere es contrarrestar las fuerzas establecidas en la cinética de la locomoción humana.

Por lo que empezamos a desarrollar un modelo que nos ayude a entender lo que pasa con estos movimientos, y lo analizaremos como si el movimiento de locomoción humana es parte de un mecanismo para desarrollar solo estos dos grados de libertad. La obtención del modelo dinámico de un mecanismo, y en particular lo que se estudia en robótica, se basa fundamentalmente en el planteamiento del equilibrio de fuerzas establecido en la segunda ley de Newton, o su equivalente para movimientos de rotación, la denominada ley de Euler.

La obtención del modelo dinámico de un robot ha sido y es objeto de estudio e investigación. Numerosos investigadores han desarrollado formulaciones alternativas, basadas fundamentalmente en la mecánica Newtoniana y

Lagrangiana, con el objeto de obtener modelos manejables por los sistemas de cálculo de una manera más eficiente, estos se basan esencialmente en un principio en la cinemática. La idea de tomar solo dos grados de la pierna tiene dos consideraciones, una es que son los movimientos principales y por los que nuestro sistema que quiere simular el movimiento de la rodilla se basa; la otra consideración es que el planteamiento del equilibrio de fuerzas en robótica de 5 o 6 grados de libertad, es mucho muy complicado. Debe tenerse en cuenta que junto con las fuerzas de inercia y gravedad, aparecen fuerzas de Coriolis debidas al movimiento relativo existente entre los diversos elementos, así como de fuerzas centrípetas que dependen de la configuración instantánea del manipulador.



Figura 2.1. Estudio de fuerzas en la marcha.

Del esquema anterior podemos obtener la cinemática directa de la pierna.

En la primera unión:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\ell_{1c} \cos q_1 \\ -\ell_{1c} \sin q_1 \end{bmatrix}$$

En la segunda unión:

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\ell_{1c} \cos q_1 - \ell_2 \cos(q_1 + q_2) \\ -\ell_{1c} \sin q_1 - \ell_2 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix}$$

De la cinemática directa obtenemos la derivada de nuestros sistemas para obtener el Jacobiano y las velocidades.

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J(q) \dot{q}$$

$$v_1 = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{z}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell_{1c} \text{sen} q_1 \\ -\ell_{1c} \cos q_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}$$

$$v_2 = \begin{bmatrix} \dot{y}_2 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell_{1c} \text{sen} q_1 + \ell_{2c} \text{sen}(q_1 + q_2) & \ell_{2c} \text{sen}(q_1 + q_2) \\ -\ell_{1c} \cos q_1 - \ell_{2c} \cos(q_1 + q_2) & -\ell_{2c} \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}$$

La idea ahora de realizar el modelo por medio de la cinemática es encontrar estabilidad en sistemas como este, que denota un sistema no lineal; es decir, la idea principal es usar el método directo de Lyapunov para el estudio de la estabilidad de sistemas no lineales que se basa en que si la energía total de un sistema mecánico o eléctrico es continuamente disipada, entonces el sistema acabará convergiendo hacia un punto de equilibrio.

De este modo, podemos deducir la estabilidad del sistema examinando la variación de una función escalar representativa de su estado energético. Un sistema no lineal puede representarse como un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales de la forma $\dot{x} = f(x, t)$. Aunque esta ecuación no contiene explícitamente la entrada de control como una variable, se puede aplicar a sistemas de control retroalimentados, ya que la entrada de control será función del estado x y del tiempo t .

Por tanto: $\dot{x} = f(x, u, t)$ y como $u = g(x, t)$ sustituyendo tendremos una dinámica en lazo cerrado de $\dot{x} = f(x, g(x, t), t)$.

Además de que en un estado x^* puede ser un punto de equilibrio del sistema si $f(x^*) = 0$. Es decir una vez $x(t)$ ha alcanzado estado x^* , permanece en dicho estado para todo tiempo futuro.

Analizando la función de Lyapunov, si en un entorno BR_0 la función $V(x)$ es definida positiva, tiene derivadas parciales continuas y su derivada a través de una trayectoria de estado es definida seminegativa ($\dot{V}(x) \leq 0$) entonces decimos que $V(x)$ es una función de Lyapunov del sistema.

Por otro lado el Teorema de Lyapunov para estabilidad local nos dice que si en un entorno BR_0 existe una función escalar $V(x)$ con las primeras derivadas parciales continuas tal que,

- $V(x)$ es definida positiva (localmente en BR_0)
- $\dot{V}(x)$ es semidefinida negativa (localmente en BR_0)

entonces decimos que el punto de equilibrio es localmente estable. Si $\dot{V}(x)$ es definida negativa localmente en BR_0 , entonces la estabilidad es asintótica.

Y para la estabilidad global, nos menciona que si existe una función escalar V del estado x , con derivadas primera continuas tal que:

- $V(x)$ es definida positiva.
- $\dot{V}(x)$ es definida negativa.
- $V(x) \rightarrow \infty$ cuando $\|x\| \rightarrow \infty$

Entonces el punto de equilibrio en el origen es asintóticamente estable de manera global.

Una problemática habitual en el análisis de estabilidad de los sistemas no lineales es encontrar una función de Lyapunov.

Con esta finalidad, es interesante fijarse en la física del sistema. De esta manera evitaremos el engorroso método de prueba y error, por tal razón encontraremos el modelo de nuestro sistema a partir de Lyapunov de tal forma que encontremos estabilidad asintótica global a partir de un controlador de posición PD.

La dinámica del sistema se puede asemejar al modelo dinámico de un robot que puede expresarse por un conjunto de n ecuaciones no lineales como sigue:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + g(q) = \tau$$

Donde q es un vector de n dimensiones que describe las articulaciones de la pierna, τ es el vector de par de entrada, C representa las fuerzas de Coriolis y centrípetas provocadas por el movimiento de los segmentos de la pierna, g modela el efecto de la gravedad y M es la matriz de inercia de dimensión $n \times n$.

La misma τ podemos manifestarla por medio del Lagrangeano, dado por:

$$\tau = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial L}{\partial q}$$

Donde L es el lagrangeano dado por el análisis de las energías.

$L = k_T(q, \dot{q}) - V_T(q)$; donde k es energía cinética y V la energía potencial, y están dadas por:

$$\begin{aligned}
k_1 &= \frac{1}{2} m_{1c} v_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{q}_1^2 \\
k_2 &= \frac{1}{2} m_{2c} v_2^2 + \frac{1}{2} I_2 \left(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 \right)^2 \\
k_T &= k_1 + k_2 \\
V_T &= V_1 + V_2 = m_{1c} g h_{1c} + m_{2c} g h_{2c}
\end{aligned}$$

Donde las masas y las alturas h se encuentran en sus centros de masas.

Tomando las velocidades encontradas por medio de la cinemática directa tenemos:

$$\begin{aligned}
v^2 &= v \cdot v^T \\
v_1^2 &= \ell_1^2 \dot{q}_1^2 \\
v_2^2 &= \ell_1^2 \dot{q}_1^2 + \ell_2^2 \left(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 \right)^2 + (2\ell_1 \ell_2 \cos q_2) \left(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 \right) \dot{q}_1
\end{aligned}$$

Obteniendo las energías.

$$\begin{aligned}
k_T(q, \dot{q}) &= \frac{1}{2} m_{1c} \ell_1^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_{2c} \left(\ell_1^2 \dot{q}_1^2 + \ell_2^2 \left(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 \right)^2 + (2\ell_1 \ell_2 \cos q_2) \left(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 \right) \dot{q}_1 \right) + \frac{1}{2} I_2 \left(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 \right)^2 \\
V_T(q) &= V_1 + V_2 = m_{1c} g (\ell_1 - \ell_{1c} \cos q_1) + m_{2c} g (\ell_1 + \ell_2 - \ell_{1c} \cos q_1 - \ell_{2c} \cos(q_1 + q_2))
\end{aligned}$$

Por lo encontramos el modelo dinámico de la siguiente forma:

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q}$$

Donde:

$$M(q) \ddot{q} = \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_1} \right]_{\ddot{q}_1} & \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_1} \right]_{\ddot{q}_2} \\ \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_2} \right]_{\ddot{q}_1} & \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_2} \right]_{\ddot{q}_2} \end{bmatrix} \ddot{q}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right]_{\dot{q}_1} - \frac{dL}{dq}_{\dot{q}_1} & \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right]_{\dot{q}_2} - \frac{dL}{dq}_{\dot{q}_2} \\ \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \right]_{\dot{q}_1} - \frac{dL}{dq}_{\dot{q}_1} & \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \right]_{\dot{q}_2} - \frac{dL}{dq}_{\dot{q}_2} \end{bmatrix} \dot{q}$$

Teniendo como resultado el siguiente modelo dinámico del sistema:

$$M(q)\ddot{q} = \begin{bmatrix} m_1 \ell_1^2 + I_1 + m_2 \ell_1^2 + m_2 \ell_2^2 + 2m_2 \ell_1 \ell_2 \cos q_2 + I_2 & m_2 \ell_2^2 + 2m_2 \ell_1 \ell_2 \cos q_2 + I_2 \\ m_2 \ell_2^2 + m_2 \ell_1 \ell_2 \cos q_2 + I_2 & m_2 \ell_2^2 + I_2 \end{bmatrix} \ddot{q}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2 \ell_1 \ell_2 \sin q_2 \dot{q}_1 & 0 \\ 0 & -m_2 \ell_1 \ell_2 \sin q_2 \dot{q}_1 \end{bmatrix} \dot{q}$$

$$g(q) = g \begin{bmatrix} m_1 \ell_{1c} \sin q_1 + m_2 \ell_{1c} \sin q_1 + m_2 \ell_{2c} \sin(q_1 + q_2) \\ m_2 \ell_{2c} \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix}$$

Consideramos ahora un controlador compuesto por un término PD y un término compensador de la gravedad. Por tanto, la orden de control para el sistema encontrado tendrá la siguiente forma:

$$\tau = -k_D \dot{q} - k_P q + g(q)$$

Teniendo en cuenta ciertas consideraciones físicas de la estructura de la pierna, podremos encontrar una función de Lyapunov adecuada para nuestros propósitos. Observemos lo siguiente:

En primer lugar observamos que la matriz de inercia M es definida positiva para cualquier valor de q.

En segundo lugar, el controlador proporcional-derivativo puede ser interpretado como una combinación de coeficientes de amortización.

Esto sugiere la siguiente función de Lyapunov como candidata:

$$V = \frac{1}{2} \left[\dot{q}^T M \dot{q} + q^T k_p q \right]$$

Donde el primer término representa la energía cinética del manipulador y el segundo representa una «energía potencial artificial» asociada con la amortización de ley de control PD.

Para derivar la función anterior podemos considerar el principio físico de que el ritmo de cambio de la energía de un sistema mecánico es igual a la energía proporcionada por fuerzas externas. Por tanto tendremos:

$$\dot{V} = \dot{q}^T (\tau - g) + \dot{q}^T k_p q$$

Sustituyendo el controlador PD inicial en la anterior expresión tendremos:

$$\dot{V} = \dot{q}^T k_D \dot{q} < 0$$

Por tanto el sistema en lazo cerrado será asintóticamente estable y el error de seguimiento tenderá a cero. Esto nos indica que con un controlador bien diseñado y tomando en cuenta los movimientos y las fuerzas inerciales del sistema en cada uno de sus miembros, podemos tener un aproximado control, entonces el control propuesto para el microcontrolador que se emplee, pudiera ser el control arriba descrito como PD no lineal o la construcción de controladores adaptivos que si bien no atacan todas las variables del sistema, pudieran ser lo suficientemente buenos para realizar control.

El modelado mediante la formulación de Lagrange-Euler que Uicker en 1965 utilizó, da una representación de D-H basada en las matrices de transformación homogénea para formular el modelo dinámico de un robot mediante la ecuación de Lagrange.

Este planteamiento utiliza, por tanto, las matrices que relacionan el sistema de coordenadas de referencia del elemento i con el elemento $i-1$. Se realizan en este caso operaciones de producto y suma innecesarias. Se trata de un procedimiento ineficiente desde el punto de vista computacional.

Puede comprobarse que el algoritmo es de un orden de complejidad computacional $O(n^2)$, es decir, el número de operaciones a realizar crece con la potencia 2 del número de grados de libertad. Sin embargo, conduce a unas ecuaciones finales bien estructuradas donde aparecen de manera clara los diversos pares y fuerzas que intervienen en el movimiento.

Se presenta a continuación el algoritmo a seguir para obtener el modelo dinámico del robot por el procedimiento de Lagrange-Euler (L-E).

2.2 Teoría de control difuso.

La teoría que ha continuación se describe es utilizada en el proyecto por dos principales razones, el microcontrolador a ocupar tiene una capacidad mínima para el control del sistema, y el segundo motivo es que el sistema debe ser portátil, por lo que estamos restringidos a usar un mínimo de capacidad computacional, por lo que nos lleva a usar métodos adaptivos que regulen las variables sin necesidad de procesar todo el análisis matemáticos estudiados en la sección anterior.

La teoría difusa es una expansión de la teoría matemática de conjuntos, que surge como una opción de introducir un lenguaje más humano a las matemáticas de

conjunto riguroso, es decir, un conjunto en la matemática rigurosa es perteneciente a un conjunto o no de un rango de números dados, tal conjunto de datos se dice que **pertenece o no pertenece** al rango de números dados, ésta pertenencia rigurosamente se denota digitalmente como 1 si es que se encuentra dentro del rango y es 0 si no pertenece al conjunto; lo difuso o teoría Fuzzy nos menciona que puede existir un grado de pertenencia al rango o conjunto de números dado, es aquí donde estriba toda la teoría difusa, que es una expansión de la teoría clásica de conjuntos.

La teoría difusa, tiene su fundamentación con un lenguaje natural humano, donde se denota que algo tiene un grado de pertenencia con un conjunto o un grupo de cosas, es decir una vaga (difusa) idea de que algo pertenece, veamos un ejemplo para explicar lo anterior.

Sea que el número x pertenece al conjunto de los números naturales N , sin embargo dicho número también puede pertenecer a los números reales R . Por lo tanto, x es un número que tiene pertenencia en ambos conjuntos, por lo que se puede decir que su pertenencia es compartida en lenguaje humana, entra en acción un concepto de a que conjunto pertenece más, eso indiscutiblemente depende del número en estudio x , es aquí donde se crea una función determinada por la pertenencia, dicha pertenencia oscila entre el rango de 0 a 1.

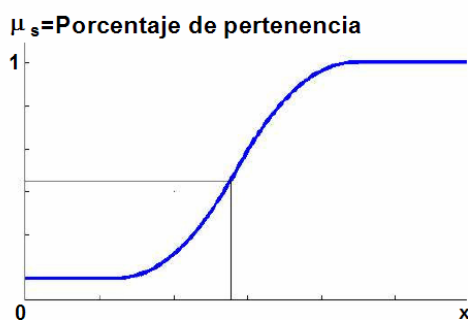


Figura 2.2. Función borrosa de pertenencia.

El número x que se mueve en un rango de números posibles pueda que cambie su porcentaje de pertenencia de un conjunto a otro y este puede oscilar según nos muestra la gráfica de 0 a 1.

Entrando en nuestro proyecto, en la locomoción humana, se pueden plantear variables con un lenguaje más amigable de las variables biomecánicas, como es el grado de inclinación de la rodilla que para nuestro proyecto es sumamente importante. Por ejemplo, el ángulo de inclinación del muslo α es un conjunto del rango de ángulos de 0° a -110° , determinado por el estudio de locomoción visto en el capítulo anterior, entonces podemos poner conceptos de lenguaje humano en conjuntos de función de pertenencia como flexión alta, flexión media, o flexión nula, subconjuntos vagos o difusos determinados por el programador, donde la variable α por consecuencia tendrá un porcentaje de pertenencia a cada uno de estas terminologías, entonces se tiene un subconjunto difuso dado por la pertenencia $f_\alpha(\mu_s)$ en cada una de los subconjuntos difusos dados como flexión.

A partir de las cantidades de pertenencia de la variable α en los subconjuntos difusos se crea una salida correspondiente a los resultados, es decir, si se tiene mayor pertenencia en una flexión alta, indiscutiblemente el giro de la rodilla será mucho mayor, a todo este proceso se le conoce con el transcurso de tres partes del control que son:

1. Fuzzificación. Creación de conjuntos difusos.
2. Toma de decisiones. Transcurso de valores de pertenencia al conjunto difusos de salida.
3. Defuzzificación. A partir de los conjuntos difusos de salida obtener un valor real de la variable controlada del sistema.

2.3 Modelo difuso.

Los modelos difusos son usados cuando se tiene un modelo matemático no lineal y que es aproximado a un modelo difuso con terminología común y con bajo procesamiento computacional. Para nuestro caso el modelo matemático nos explica que el sistema tiene la posibilidad de ser estable asintóticamente o localmente, por lo que con algunas consideraciones mecánicas esto podrá ser más estable y con el control difuso se podrá controlar sin problemas a partir del análisis de la variable principal a controlar que es la inclinación del muslo así como la rapidez con la que se mueve.

Como se demostró en el modelo matemático del sistema se lleva a la estabilidad con un controlador no línea PD, por lo que en el capítulo de diseño se describirá un control difuso PD.

Partamos de que:

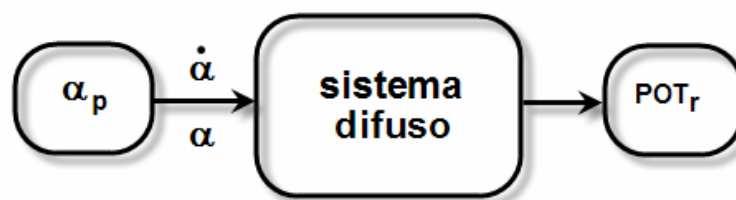


Figura 2.3. Bloques de un diseño difuso.

Se denota que las entradas de del sistema son principalmente la posición y la velocidad del ángulo α para inicial el proceso difuso, y se determina una salida de potencia POT que dará energía al motor, con dirección y duración de movimiento hasta satisfacer el la posición del muslo α .

Los elementos básicos de la teoría difusa son:

1. Una base de reglas conocidas a partir de la observación simple de la locomoción humana.
2. Mecanismo de inferencia o toma de decisiones.
3. Los conceptos de Fuzzificación y defuzzificación.

Para este caso de la locomoción humana esto se traduce en:

1. Compara las variables de entrada α con las funciones difusas que el programador establezca de acuerdo a las pertenencias que oscilan entre 0 y 1.
2. Aplicación de operadores difusos como la AND y OR en los aspectos de decisión, al examinar las variables de entrada, por si en las combinaciones de estas se cumplen, tendrán una repercusión en la decisión de salida, para esto se crea una salida borrosa como ENTONCES, generando tomas de decisión dentro del programa.
3. La defuzzificación es realizada después de haber tomado la decisión y una forma más común de realizarlo es por medio del centroide, que es un promedio de las partencias de la variable de salida con respecto a los subconjuntos borrosos de salida.

$$Q = \frac{\sum \text{per(salida)} \cdot \text{centroide}}{\sum \text{per(salida)}}$$

Los tipos de reglas para realizar la toma de decisiones es la parte fundamental de que si el control funcione o no, a continuación se describen ejemplos de estas reglas.

$$Si : (\alpha \text{ _ AND _ } \dot{\alpha}) \text{ _ Entonces _ } \mu_{POTENCIA}$$

$$Si : (\alpha \text{ _ OR _ } \dot{\alpha}) \text{ _ Entonces _ } \mu_{POTENCIA}$$

2.3.1 Identificación difusa.

A partir de las tomas de decisiones, se crean pertenencias de salida con forme a los subconjuntos difusos de salida, dado por:

$$\mu_{salida} \left[\overset{\bullet}{\alpha}, \alpha \right]$$

Esta expresión nos da la oportunidad de sintonizar la salida conforme al sistema en estudio, es nuestro caso, este paso es importante en el diseño, ya que se pueden crear interferencias al sistema como son los límites de la flexión y extensión de la rodilla y también se puede jugar con la sensibilidad de la variable de control.

Por otra parte el modelado difuso permite generalizar por lógica difusa de la variable de control al solo tomar dos valores y la medición mediante sistemas digitales y análogos.

2.3.2 Funciones difusas.

Una cuestión también importante en el desarrollo de esta teoría son las funciones borrosas en el proceso de fuzzificación y defuzzificación, por lo regular las funciones son posiciones trapezoidales o triangulares, las triangulares son utilizadas cuando el sistema en estudio es muy rápido y no existe un espacio donde el sistema entre en reposo.

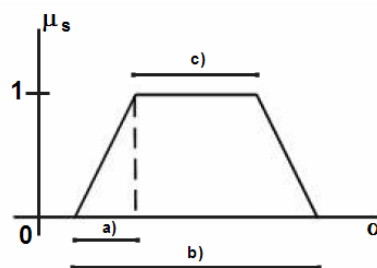


Figura 2.4. Función de pertenencia trapezoidal.

En la gráfica anterior se denotan tres incisos, los cuales son:

- a) Rango de variación de pertenencias
- b) Rango completo de valores de la función.

c) Rango de valores donde entra en reposo y no sale del subconjunto difuso.

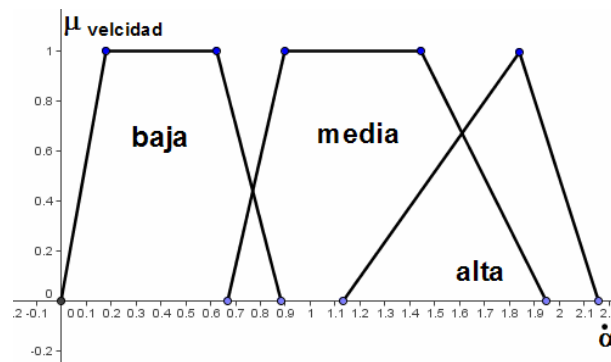


Figura 2.5. Ejemplo de funciones de pertenencia de una variable.

En la gráfica anterior se muestra un ejemplo de cómo las funciones son generadas, para este caso la gráfica trabaja con la velocidad del ángulo $\dot{\alpha}$, por lo que a una velocidad es pequeña se dice que tiene mucha pertenencia en el subconjunto difuso bajo y mientras la variable va creciendo cambia de pertenencia en los demás subconjuntos, note que cuando esta crece cada vez más, la pertenencia de en el subconjunto alta crece y de repente disminuye considerablemente, esto puede denotar un límite en el sistema, además que el cambio de pertenencias en este subconjunto es sumamente rápido.

El hecho de trabajar con la variable en sus dos estados $(\alpha, \dot{\alpha})$ es propio de un control difuso del tipo PD.

A partir de estas funciones se empiezan a describir las reglas de inferencia con forme a las variables de pertenencia.

Para las funciones de salida, como se quiere emplear un centroide esta definido como se muestra en la siguiente figura.

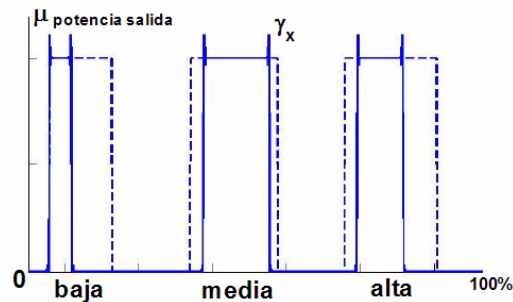


Figura 2.6. Funciones de defuzzificación.

En la gráfica anterior se muestran rangos de valores del tipo de potencias que se quieren en las salidas, los subconjuntos difusos nombrados como baja, media y alta están determinados por los límites punteados, sin embargo las tomas de decisiones a partir de las reglas de inferencia están denotadas por una γ_x que es un punto dado como resultado, esto quiere decir que puede haber muchas salidas a partir de las reglas de inferencia, por lo que se hace ya notorio el uso del promedio por medio del centroide visto anteriormente.

2.3.3 Inferencia difusa.

La inferencia consiste en determinar los subconjuntos con sus funciones de pertenencia a partir de un procedimiento de identificación inicial, en relación con las variables de entrada y las reglas de inferencia.

Posteriormente se emplea un procedimiento de optimización de los para el ajuste de los parámetros de linealizados a partir del modelo matemático estudiado del sistema a controlar.

Veremos la técnica de agrupamiento difuso (Fuzzy mean clustering) que consiste en encontrar agrupamientos de los rangos de las funciones de pertenencia de los datos naturales estudiados. El método determina el número de grupos de pertenencia C y los rangos determinados en cada uno m , que muestra el grado de

empalme de los rangos, de tal forma que podemos encontrar el centro de la función v_i , para minimizar los rangos de la función, de tal forma que:

$$J(U, v) = \sum \sum (u_{i,j})^m |x_k - v_i| \quad \text{Donde:} \quad k \geq 1$$

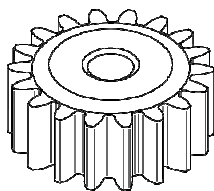
La expresión describe a x_k es la entrada puntual que en nuestro caso es el ángulo α , y donde $u_{i,j}$ es la variable de pertenencia de de dicha entrada, y m es el indicador de cuantos rangos existen en la función de pertenencia, utilizado para minimizar e número de rangos y hacer más optimo en el diseño de la fuzzificación.

Donde los parámetros son:

1. Entradas: $(\alpha, \dot{\alpha})$
2. Números de funciones de pertenencia: $[1,3,5,7]$
3. Tipo de funciones: Triangulares.

Esto es una de los parámetros que se emplearan en el diseño de controlado PD difuso.

2.4 Engranés.



Los ejes rectos transmiten movimientos rotatorios entre ejes paralelos, son circulares y los dientes son rectos y paralelos al eje de rotación.

La altura se describe de la superficie inferior a la superficie superior, el círculo de paso es un círculo teórico sobre el que generalmente se basan todos los cálculos, por el pasa los dos engranes y son acoplados tangencialmente.

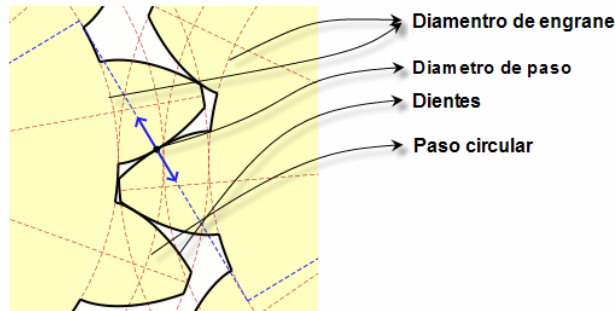


Figura 2.7. Partes de un engrane 1.

Entonces decimos que una relación útil debe ser como sigue:

$$P = N/d \quad m = d/N$$

Donde: P es el paso diametral, dientes por pulgada.

N = Números de dientes.

d = diámetro de paso pulgada o metro.

m = módulo, mm.

Por lo tanto:

$$P_c = \frac{\pi d}{N} = \pi m$$

Donde P_c es el paso circular.

Por otro lado: $P_c P = \pi$

La acción de los engranes es el conjunto de los dientes uno sobre otro para producir un movimiento rotatorio, la fundamentación consiste en lograr una razón constante entre las velocidades angulares durante el adentamiento, donde los

dientes son acoplados perfectamente con otro engrane de las mismas dimensiones, a esto se lo conoce como envoltura. Teniendo en cuenta que los dientes deben tener una línea fija de los centros de los engranes para que no se desfasen los dientes que están pasando uno con otro por el punto de paso.

La razón de cambio de las velocidades angulares son:

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{r_2}{r_1}$$

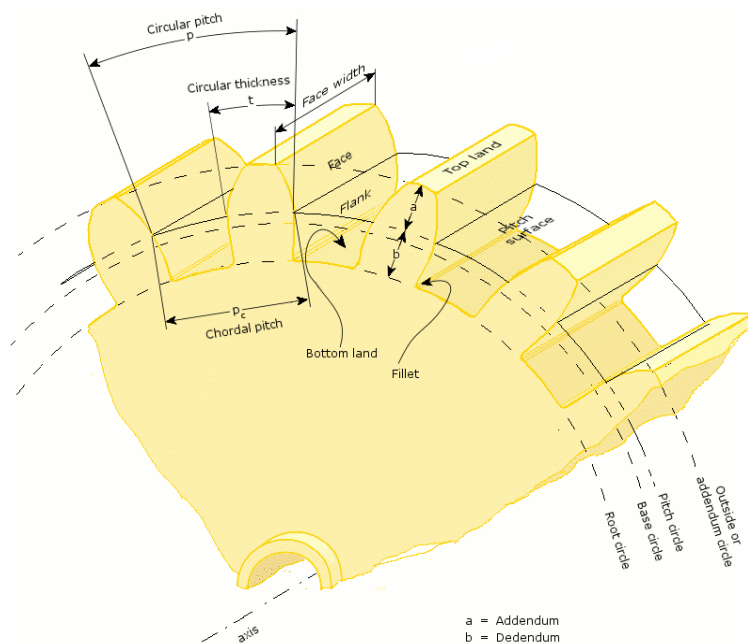


Figura 2.8. Partes de un engrane 2.

El módulo de un engranaje es una característica de magnitud que se define como la relación entre la medida del diámetro primitivo expresado en milímetros y el número de dientes. En los países anglosajones se emplea otra característica llamada Diametral Pitch, que es inversamente proporcional al módulo. El valor del módulo se fija mediante cálculo de resistencia de materiales en virtud de la potencia a transmitir y en función de la relación de transmisión que se establezca. El tamaño de los dientes está normalizado cotidianamente al comprar una transmisión para un moto-reductor. El módulo está indicado por números. Dos engranajes que engranen tienen que tener el mismo módulo.

El Espesor del diente es el grosor del diente en la zona de contacto, o sea, del diámetro primitivo.

El número de dientes que tiene el engranaje, se simboliza como Z . Es fundamental para calcular la relación de transmisión.

El diámetro de la circunferencia que limita la parte exterior del engranaje.

El diámetro de la circunferencia que limita el pie del diente.

El pie del diente también se conoce con el nombre de dedendum.

La cabeza del diente también se conoce con el nombre de addendum.

El flanco es la cara interior del diente, es su zona de rozamiento.

El ángulo de presión es el que forma la línea de acción con la tangente a la circunferencia de paso, (20° ó 25° son los ángulos normalizados).

La relación de transmisión tanto en caso de reducción como de multiplicación depende de la velocidad que tenga la transmisión.

Diámetro primitivo: $D_p = Z \cdot M$

Módulo: $M = \frac{D_p}{Z}$

Paso circular: $P_c = \pi \cdot M$

Número de dientes: $Z = \frac{D_p}{M}$

Diámetro exterior: $D_e = (Z + 2) \cdot M$

Diámetro interior: $D_i = D_p - 2,50 \cdot M$

Pie del diente: $1,25 \cdot M$

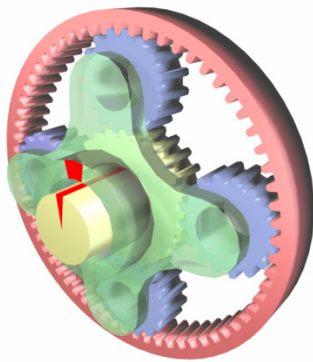
Cabeza del diente: M

Altura del diente: $(2,25 \cdot M)$

Distancia entre centros: $\frac{(D_p + d_p)}{2}$

Ecuación general de transmisión: $N \cdot Z = n \cdot z$

2.4.1 Engranajes Satelitales.



Un engranaje planetario es un sistema de engranajes consistente en uno o más engranajes externos o satélites que rotan sobre un engranaje central o planeta. Típicamente, los satélites se montan sobre un brazo móvil o porta satélites que a su vez puede rotar en relación al planeta. Los sistemas de engranajes planetarios pueden incorporar también el uso de un engranaje anular externo o corona, que engrana con los satélites.

La velocidad de transmisión en un sistema de engranaje planetario es muy poco intuitiva, especialmente porque hay varias formas de convertir la rotación de entrada en una de salida. Los tres componentes básicos de un engranaje satelital son:

- Planeta: El engranaje central.
- Portasatélites: Sujeta uno o más engranajes satélite periféricos, del mismo tamaño, engranados con el planeta.
- Corona: Un anillo externo con dientes en su cara interna que engrana con el o los satélites.

En cualquier sistema de engranaje planetario, uno de estos tres componentes básicos permanece estacionario, uno de los dos restantes es la entrada, proporcionando potencia al sistema, y el último componente es la salida, recibiendo la potencia del sistema. La relación de la rotación de entrada con la de salida depende del número de dientes de cada rueda y de qué componente permanezca estacionario.

Una situación es cuando el porta satélites permanece estacionario y el planeta se usa como entrada. En este caso, los satélites simplemente rotan sobre sus propios ejes a una velocidad determinada por el número de dientes de cada engranaje. Si el planeta tiene P dientes y cada satélite tiene S dientes, entonces la relación es igual a $-P/S$.

Esta rotación de los satélites puede a su vez impulsar la corona, en una relación correspondiente. Si la corona tiene C dientes, entonces rotará S/C giros por cada uno de los satélites:

- Un giro del planeta provoca $-P/S$ giros de los satélites
- Un giro de los satélites provoca S/C giros de la corona

Por tanto, con el porta satélite bloqueado, un giro del planeta provoca $-P/C$ giros de la corona.

La corona también puede dejarse fija, realizando la entrada sobre el portasatélites, produciéndose así la rotación de salida en el planeta. Esta configuración producirá una relación de cambio mayor, igual a $1+C/P$.

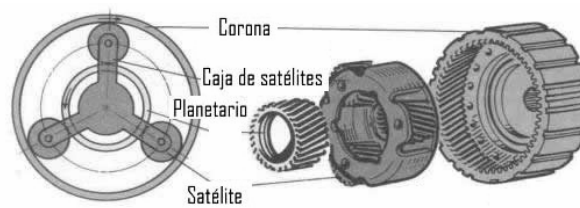


Figura 2.9. Partes de un engranes satelitales 1.

2.4.2 Mecanismos de tornillo sin fin.

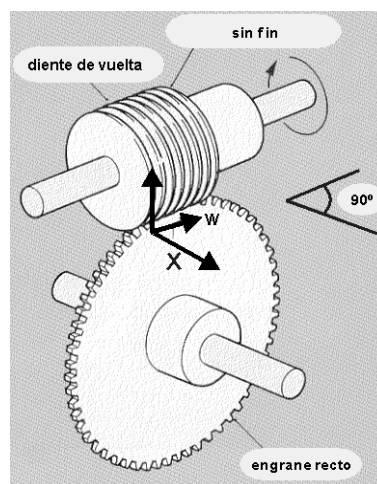


Figura 2.10. Funcionamiento de un engrane sin fin.

En la figura muestra un tornillo sin fin, donde debe notarse que los ejes no se cortan y que el ángulo entre los mismos es de 90° ; éste es el usual entre ejes, aunque pueden utilizarse otros. El tornillo sin fin, a veces llamado simplemente sinfín, se distingue por la figura que tiene, quizá cinco o seis dientes (o hilos de rosca). Un gusano de un diente se asemejaría mucho a un hilo de rosca tipo ame.

Los mecanismos de tornillo pueden ser simple o doblemente envolventes. Los de primer tipo son aquellos en los que la rueda envuelve o encierra parcialmente al tornillo. Los mecanismos en los que cada elemento envuelve parcialmente al otro son, desde luego, los doblemente envolventes. La diferencia más importante que hay entre los dos es que existe contacto de superficie entre los dientes de los

elementos doblemente envolventes y solo contacto de línea entre los elementos simplemente envolventes.

Al especificar el paso en mecanismos de tornillo sin fin se acostumbra a enunciar el paso axial P_x del tornillo y el paso circular transversal P_t (a veces llamado simplemente paso circular) del engrane conectado. Estos pasos son iguales cuando el ángulo entre ejes es de 90° . El diámetro de paso del engrane es el diámetro medido sobre un plano que contiene al eje del gusano, como se muestra en la figura 2; es el mismo que para los engranes rectos y vale.

$$d_G = \frac{N_G P_t}{\pi}$$

Puesto que no hay relación con el número de dientes, el tornillo sin fin puede tener cualquier diámetro de pasó; sin embargo, este debe ser igual al del paso del cortador utilizado para formar los dientes del engrane del gusano. Por lo general hay que seleccionar el diámetro de paso del sin fin de modo que quede dentro del intervalo

$$\frac{C^{0.875}}{3.0} \leq d_w \leq \frac{C^{0.875}}{1.7}$$

Donde C es la distancia entre centros. Estas proporciones dan como resultado la capacidad optima de potencia del mecanismo.

El avance L y el ángulo de avance λ del sin fin tienen las siguientes relaciones:

$$L = P_x N_w$$

$$\tan \lambda = \frac{L}{\pi d_w}$$

Las formas de dientes para los mecanismos de gusano no han sido ampliamente estandarizadas, quizá por que se empleen cada vez menos y no ha sido muy necesario. Los ángulos de presión empleados dependen de los ángulos de avance, y deben ser lo suficientemente grandes para evitar el rebaje por corte de los dientes del engrane en el lado que se termina el contacto. Una altura de dientes satisfactoria, que guarde la proporción correcta con el ángulo de avance, puede obtenerse dando a la altura un valor en proporción al del paso circular axial. La tabla 1 resume lo que se consideraría buena practica para valores de ángulos de presión y de altura de dientes.

El ancho de cara FG de la rueda del sinfín debe ser igual a la longitud de una tangente a la circunferencia de paso del sinfín entre sus puntos de intersección con la circunferencia de adendo, como se indica en la figura 3.

Si se desprecia la fricción, entonces la única fuerza ejercida por el engrane seria W , que tiene tres componentes ortogonales: W_x , W_y y W_z . Por la configuración geométrica de la figura se aprecia que

$$W_x = W \cos \phi_n \sin \lambda$$

$$W_y = W \sin \phi_n$$

$$W_z = W \cos \phi_n \cos \lambda$$

Ahora se utilizaran los subíndices W y G para indicar las fuerzas que actúan contra el gusano y el engrane, respectivamente. Se observa que W_y es la fuerza radial o de separación para el gusano y la rueda. La fuerza tangencial que actúa sobre el tornillo sinfín W_x y sobre el engrane es W_x , suponiendo que el ángulo entre ejes es de 90° . la fuerza axial sobre el sinfín es W_z . Puesto que las fuerzas en el engrane son opuestas a las que actúan en el tornillo, estas relaciones se resumen como sigue.

$$W_{Wi} = -W_{Gi} = W_X$$

$$W_{Wr} = -W_{Gr} = W_Y$$

$$W_{Wa} = -W_{Ga} = W_Z$$

Al utilizar las ecuaciones anteriores es útil observar que el eje del engrane es paralelo a la dirección x, que el eje del sinfín es paralelo a la dirección z y se ha empleado un sistema derecho de coordenadas.

En el estudio de engranes de dientes rectos se vio que el movimiento de un diente relativo al del diente embonante es principalmente un rodamiento; de hecho, cuando el contacto ocurre en el punto de paso, el movimiento es una rodadura simple. En contraste, el movimiento relativo entre los dientes de gusano y rueda es un deslizamiento puro y, así, es de esperar que la fricción tenga un papel importante en el funcionamiento de un mecanismo de sinfín. Introduciendo el factor de fricción μ se obtiene otro conjunto de relaciones similares a las de las ecuaciones anteriores. En la figura 4 se ve que la fuerza W , normal al perfil del diente del sinfín, produce una fuerza de fricción $W_f = \mu W$, que tiene una componente $\mu W \cos \lambda$ en la dirección negativa de x, y otra componente $\mu W \sin \lambda$ en la dirección positiva de z. Por lo tanto las ecuaciones anteriormente mencionadas se convierten en:

$$W_X = W(\cos \phi_n \sin \lambda + \mu \cos \lambda)$$

$$W_Y = W \sin \phi_n$$

$$W_Z = W(\cos \phi_n \cos \lambda - \mu \sin \lambda)$$

Desde luego las primeras ecuaciones siguen siendo válidas.

De sustituir las ecuaciones y multiplicar por μ , se halla que la fuerza de rozamiento o fricción es:

$$W_f = \mu W = \frac{\mu W_{Gt}}{\mu \sin \lambda - \cos \phi_n \cos \lambda}$$

Hay otra relación útil que puede emplearse y relaciona las fuerzas tangenciales. Y es:

$$W_{Wt} = W_{Gt} = \frac{\cos \phi_n \sin \lambda + \mu \cos \lambda}{\mu \sin \lambda - \cos \phi_n \cos \lambda}$$

La eficiencia η puede definirse por la ecuación:

$$\eta = \frac{W_{Wt}(\sin \text{fricción})}{W_{Wt}(\cos \text{fricción})} = \frac{\cos \phi_n - \mu \tan \lambda}{\cos \phi_n + \mu \cot \lambda}$$

Si se selecciona un valor típico del coeficiente de fricción, por ejemplo, $\mu = 0.5$, y los ángulos de presión de la tabla 1, se usara la ecuación de la eficiencia para obtener información útil del diseño. Al resolver esta ecuación, despejando los ángulos de hélice de 1° a 30° , se llegan a los interesantes resultados que se muestran en la tabla 2.

Muchos experimentos han demostrado que el coeficiente de fricción depende de la velocidad relativa o deslizante. En la figura 5 VG es la velocidad en la línea de paso del engrane y VW, la velocidad en la línea de paso del sinfín. En consecuencia vectorialmente se tiene $VW = VG + VS$; y, por lo tanto

$$V_s = \frac{W_x}{\cos \lambda}$$

Los valores publicados del coeficiente de fricción varían hasta un 20 %, debido sin duda a las diferencias del acabado de superficie, materiales y lubricación. Los valores en el diagrama de la figura 6 son representativos e indican la tendencia general.

Cuando se utilizan estos dispositivos intermitentemente o a velocidades bajas del engrane la resistencia a la flexión de los dientes del engrane puede llegar a ser el factor de diseño principal. Puesto que los dientes del sinfín son intrínsecamente más resistentes que los de su engrane, por lo general no se los calcula aunque pueden utilizarse los métodos para calcular los esfuerzos en los dientes de un tornillo. Los dientes de los engranes de sinfín son gruesos y cortos en los bordes de la cara y delgados en el plano central; esto hace difícil determinar el esfuerzo por flexión. Earle Buckingham adapta la ecuación de Lewis como sigue:

$$\sigma = \frac{W_{Gt}}{P_n F_G y}$$

$$P_n = P_x \cos \lambda$$

Donde:

σ = *esfuerzo por flexión, psi*

W_{Gt} = *carga transmitida, lb*

P_n = *paso circular normal, in*

F_G = *ancho de la cara de la rueda, in*

y = *factor de la forma de Lewis relacionado con el paso circular*

λ = *ángulo de avance*

Puesto que la ecuación solo es una aproximación poco precisa no se considerará la concentración de esfuerzos. También por esta razón, los factores de forma no están relacionados con el número de dientes sino solamente con el ángulo de presión normal. Los valores de y se tienen en la tabla 3.

La ecuación de la AGMA para la potencia nominal de entrada (en HP) de un mecanismo de tornillo sin fin es:

$$H = \frac{W_{Gt} d_G n_w}{126000 m_G} + \frac{V_s W_f}{33000}$$

El primer termino del segundo miembro es la potencia de salida, y el segundo es la perdida de potencia. La carga transmitida permisible W_{Gt} se calcula con la ecuación

$$W_{Gt} = K_s d_G^{0.8} F_e K_m K_v$$

La notación de las ecuaciones anteriores es como sigue.

W_{Gt} = carga a transmitir, lb

d_G = diámetro de paso del engrane., in

n_w = velocidad del tornillo, rpm

m_G = relación de transmisión = N_G / N_w

V_s = velocidad de deslizamiento en el diametro medido del tornillo, pie/min

W_f = fuerza de fricción, lb.

K_s = factor de corrección por tamaño y materiales.

F_e = ancho de cara efectivo. *Esta dimensión es el ancho de cara del engrane o dos tercios del diámetro de paso del sinfin.*

Se usa el menor de estos valores.

K_m = factor de corrección de la relación de velocidades

K_v = factor e velocidad.

Los valores del factor del material para gusanos de acero templado que embonan con engranes de bronce se indican en la tabla 4. Debe observarse el efecto del factor de corrección por tamaño mientras aumenta el ancho de cara.

Los valores del factor de corrección de la relación de velocidades K_m y el factor de velocidad K_v se encuentran en las tablas 5 y 6 respectivamente.

2.5 Electrónica.

2.5.1 Giroscopio.

El giroscopio o giróscopo es un dispositivo electrónico en nuestro caso formado esencialmente por un cuerpo con simetría de rotación que gira alrededor de su eje. Cuando se somete el giroscopio a un momento de fuerza que tiende a cambiar la orientación del eje de rotación su comportamiento es aparentemente paradójico ya que el eje de rotación, en lugar de cambiar de dirección como lo haría un cuerpo que no girase, cambia de orientación en una dirección perpendicular a la dirección.

Los giroscopios también se han utilizado para disminuir el balanceo de navíos, para estabilizar plataformas y estabilizar las inerciales, para la navegación inercial en aviones y misiles construidos antes de la aparición del GPS. El efecto giroscópico comunica una estabilidad intrínseca a las motocicletas y a las bicicletas en movimiento.

El giróscopo o giroscopio está basado en una especie de péndulo conjugado, dando como resultado una rueda girando que no cambia su posición con respecto al plano de giro por medio de la gravedad llamado "principio de conservación del momento angular".



Figura 2.11. Giroscopio antiguo.

La mayoría de los sensores actuales de pequeño tamaño, como los que se utilizan en modelos de helicópteros y robots, están basados en integrados con pequeñas lengüetas vibratorias, construidas directamente sobre el chip de silicio. Su

detección se basa en que las piezas cerámicas en vibración son sujetas a una distorsión que se produce por el efecto Coriolis que son cambios en la velocidad angular.

En nuestro caso, se utilizara un giroscopio pizoeléctrico de la marca futaba, empleado para ajustar el balanceo de helicópteros y aviones a escala, el giroscopio es usado para automatizar la regulación de la compensación de giro en la aeronave, manteniendo a esta en una posición fija con respecto al plano horizontal. Esto es importante mencionar ya que el giroscopio sensa el giro y regula un servomotor, al termino del giro vuelve a una posición neutral, aspecto que para nuestro sistema provocará indiscutiblemente una señal senoidal, donde la amplitud nos dará los grados de inclinación y el periodo nos dará la velocidad con la que fue dada la inclinación.



Figura 2.12. Giroscopio del proyecto.

La base de este tipo de sensores es cuando una corriente fluye en un conductor (o semiconductor) y se le aplica un campo magnético perpendicular a dicha corriente, entonces la combinación de corriente y campo magnético genera un voltaje perpendicular a ambos. Este fenómeno se denomina Efecto Hall. VH es una función de la densidad de corriente, el campo magnético, y la densidad de carga y movilidad portadora del conductor.

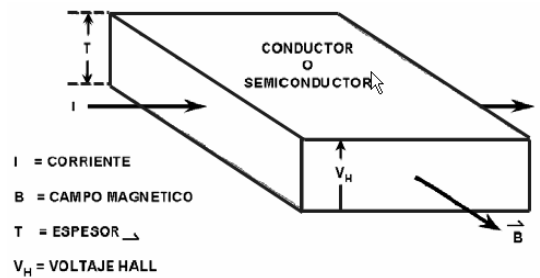


Figura 2.13. Esquema de efecto hall.

El efecto Hall se usa para hacer sensores de movimiento, particularmente en aplicaciones de posición y movimiento, lineal o rotatorio.

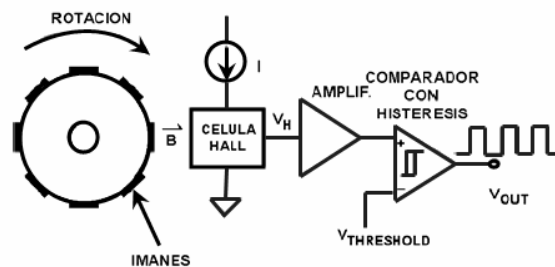


Figura 2.14. Diagrama del funcionamiento del giroscopio.

2.5.2 Microcontrolador.

El microprocesador difiere de una CPU normal en su nivel de procesamiento, es por eso que se deberá buscar el diseño de un controlador adaptivo que sea lo suficientemente fácil de ejecutar para no saturar al microcontrolador, lo que pasaría si se tomará el control no lineal PD, visto al inicio de este capítulo, sin embargo el microcontrolador a usar tiene integrado módulos que serán indispensables para el desarrollo del proyecto.

Por ejemplo, un microcontrolador típico tiene un generador de reloj integrado activado por un cuarzo de sincronización externo y una pequeña cantidad de memoria RAM y ROM/EPROM/EEPROM, significando que para hacerlo funcionar, todo lo que se necesita son unos pocos programas de control. Los

microcontroladores disponen de dispositivos de entrada/salida, como convertidores de analógico a digital, temporizadores, UARTs y buses de interfaz serie especializados, como I2C y CAN. Frecuentemente, estos dispositivos integrados pueden ser controlados por instrucciones de procesadores especializados, el microcontrolador a emplear utiliza un lenguaje de programación integrado, como el C++ que se utiliza bastante con este propósito y reduce las líneas de código comparada con el lenguaje ensamblador.

Los microcontroladores tiene una la velocidad mayor de 40MHz y tiene bastante flexibilidad en el diseño que facilitar su uso, integrando su funcionalidad de los dispositivos de entrada/salida y la memoria, el microcontrolador se puede adaptar el diseño de cualquier circuitería.

Algunos fabricantes de microcontroladores superan el millón de unidades de un modelo determinado producidas en una semana. Este dato puede dar una idea de la masiva utilización de estos componentes.

Los microcontroladores están siendo empleados en multitud de sistemas presentes en nuestra vida diaria, como pueden ser juguetes, horno microondas, frigoríficos, televisores, computadoras, impresoras, módems, el sistema de arranque de nuestro coche, etc. Y otras aplicaciones con las que seguramente no estaremos tan familiarizados como instrumentación electrónica, control de sistemas en una nave espacial, etc. Una aplicación típica podría emplear varios microcontroladores para controlar pequeñas partes del sistema. Estos pequeños controladores podrían comunicarse entre ellos y con un procesador central, probablemente más potente, para compartir la información y coordinar sus acciones, como, de hecho, ocurre ya habitualmente en cualquier PC, es por ello que se integrará en el diseño una interfase de puerto serial para el análisis de los datos generados por el giroscopio, datos que son muy importantes para establecer los rangos de valores donde se moverán las variables de control como es el ángulo y la velocidad, además de establecer la sensibilidad en el cambio de

valores, el microcontrolador a utilizar es un chip de Microchip de la familia 18F, el cual se muestra a continuación:

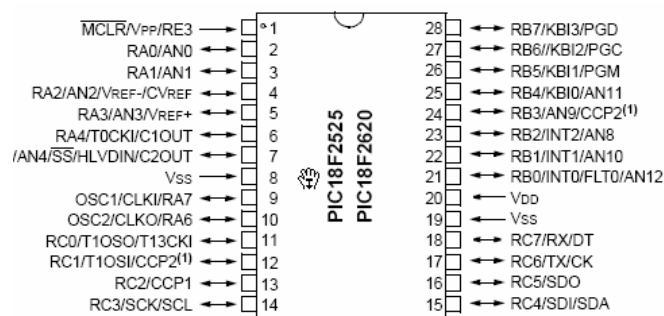


Figura 2.15. Microcontrolador del proyecto.

Capítulo Tres.

Construcción del prototipo.

3.1 Sistema Mecánico.

El primer problema a resolver fue la mecánica de la transmisión que le diera potencia al movimiento de la rodilla, se colocó un motor de corriente directa de 12 volts, a un consumo nominal de 500 a 1 ampere, con velocidad aproximada lineal de 3000 rpm. Este motor con pruebas físicas puede ofrecer un buen torque de salida en la flecha capaz de soportar un reductor grande.



Figura 3.1. Motor de DC.

La caja reductora que se consiguió fue un conjunto de engranes satelitales de 5 por un planetario en un nivel, teniendo la caja 3 niveles del conjunto de engranes el cual tiene una razón de cambio de dando como resultado un torque de salida de 126 libras/ pie con una velocidad en la salida de la flecha del reductor de 530 rpm lo suficiente para soportar aproximadamente 13 Nm aun centímetro de la flecha del reductor conforme a las ecuaciones vistas en el capítulo 2.

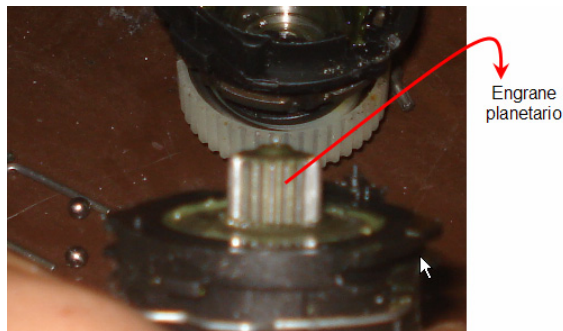


Figura 3.2. Engrane planetario de la primera caja reductora.

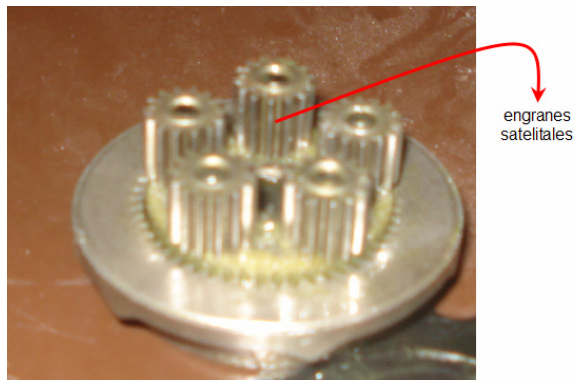


Figura 3.3. Engranés satelitales de la primera caja reductora.

Esta cantidad de torque encontrado es lo suficiente para mover al sistema por completo y soportar un peso adicional en la estructura, sin embargo la velocidad de 530 rpm es todavía demasiado rápido para mover la rodilla de la prótesis por lo que se decide colocar en la flecha la salida del reductor un acople con un engrane tipo sin fin con un engrane helicoidal, el conjunto de ambos nos da una razón de cambio de 23.043, lo que en la salida de la nueva caja reductora directamente conectado con el engrande helicoidal nos da una velocidad de salida de 23 rpm con un torque de salida 2904 libras/pie.

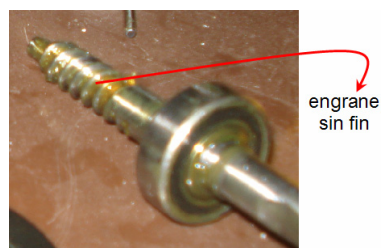


Figura 3.4. Engrane sin fin de la segunda caja reductora.

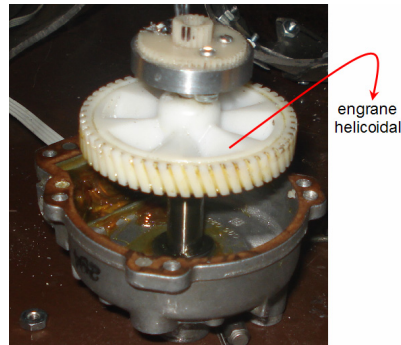


Figura 3.5. Engrane helicoidal de la segunda caja reductora.

La finalidad de colocar la última caja reductora con el engrane tipo sin fin y el engrane helicoidal fue por dos razones, la reducción que se tiene en velocidad y aumento de torque es muy grande y el sistema de la caja hace que la flecha de salida del reductor no sea regresivo en el movimiento, lo que impide que el motor de corriente directa se convierta en un pequeño generador.

Además de que el sistema mecánico en la segunda caja reductora, disminuye considerablemente la inercia descrita en el capítulo 2, lo que reduce considerablemente los posibles errores que puedan suscitarse por medio de la matriz de inercia en los cálculos del control difuso.

El soporte de la salida del segundo reductor es un sencillo empalme con el socket estructural, el socket que se diseñó para exposición, el socket que comúnmente se usa, es obtenido a partir de la medición del muñón del paciente y se determina a partir de la altura y complexión corporal del paciente.

La siguiente etapa en el diseño de la mecánica es la parte del pie, para reducir tiempo en la construcción del mismo, se consiguió un pie dinámico para prótesis comerciales.



Figura 3.6. Pie protésico.

La construcción completa del sistema mecánico se muestra a continuación.

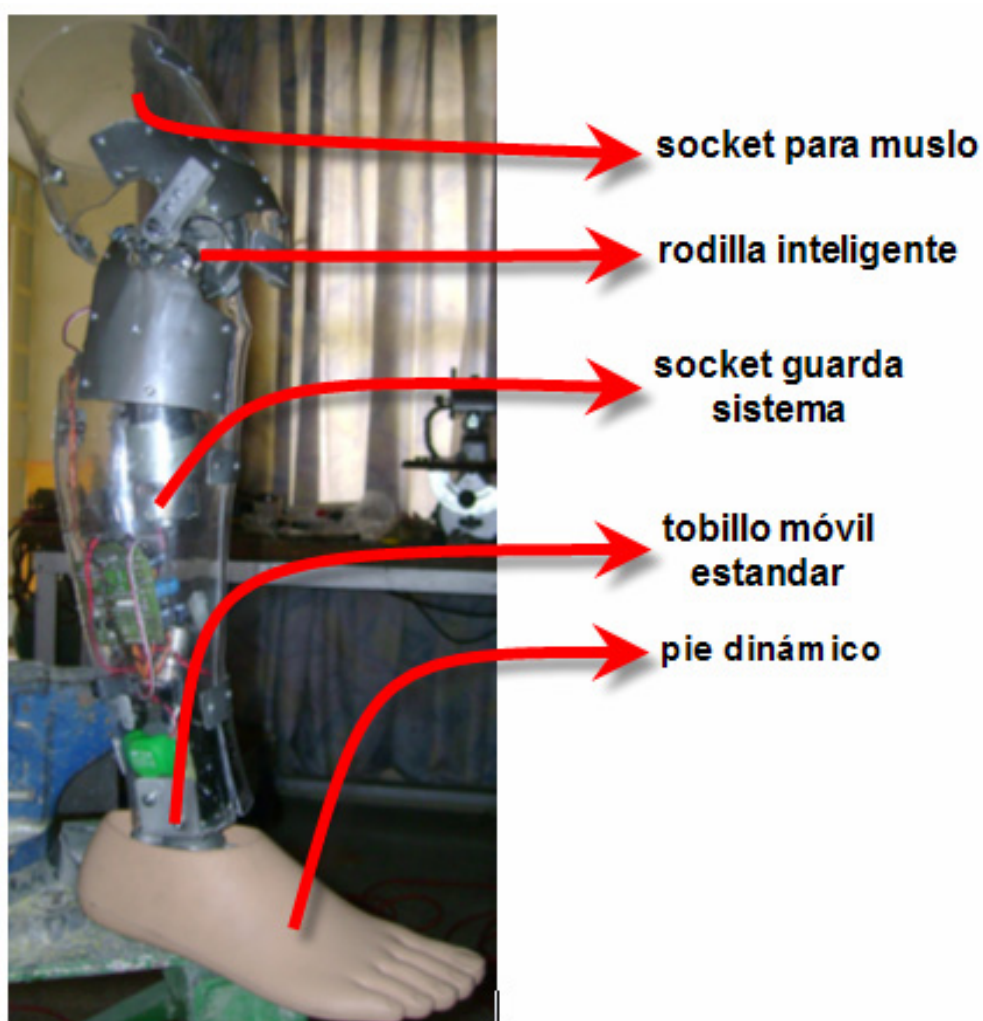


Figura 3.7. Prototipo construido.

3.2 Sistema electrónico.

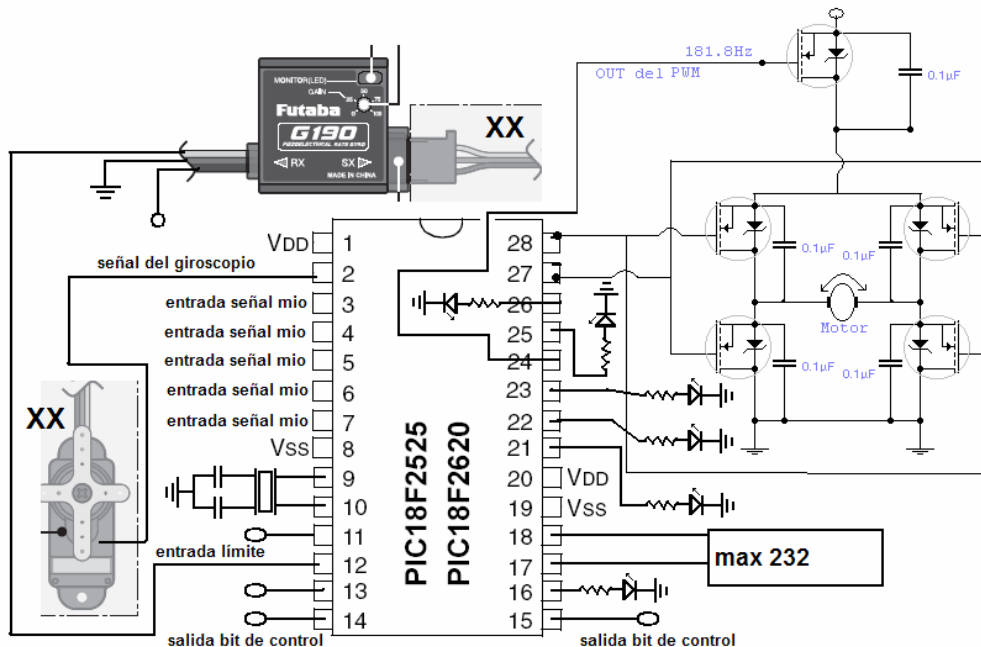


Figura 3.8. Esquema del circuito.

Se diseñó un circuito electrónico simple con la característica de tener 2 bit de salida para controlar el sentido de movimiento de motor cambiando de polaridad sus terminales por medio de un puente h sin embargo se deja consideración del lector el uso de posibles reveladores que como los mosfet's soportan corrientes que oscilan de entre 5 a 10 amperes además de un bit que controla la velocidad del motor dado por el bit 24, tan como se muestra en la anterior figura.

La otra característica es el control del giroscopio de la familia micra de la marca futaba el cual necesita para funcionar una señal PWM centrada a posición media caracterizada de un servo motor simple (ver figura 3.9), el giroscopio al tener la entrada se posiciona en su nivel medio según la posición en la que se encuentre al encender al todo el sistema. El giroscopio a su vez genera una señal PWM regulada en el ancho del pulso de trabajo proporcional al ángulo de inclinación que sense el giroscopio.

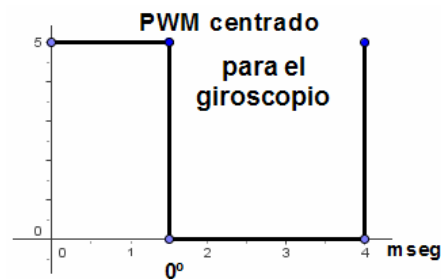


Figura 3.9. Señal PWM generada del microcontrolador.

La señal generada por el giroscopio fue enviada a un servo motor normal el cual en su parte interior tiene un adecuador y convertidor de la señal PWM aun voltaje de referencia; obteniendo el voltaje de referencia entro del giroscopio es enviado al convertidor analógico digital del microcontrolador por medio de su pin 2.

La señal observada en el giroscopio es una señal tipo senoidal en un rango de amplitud de 0 a 5 volts con un periodo aproximado de 4 milisegundos en un movimiento estándar de giro de muñeca; dato importante ya que nos representa nuestro primer error de conversión al no tener una buena referencia de cuanto tiempo dura el periodo de la señal senoidal generada por el giroscopio en un movimiento sumamente rápido sin embargo ya que estamos hablando de un movimiento de muslo se considera una duración de no más de un milisegundo en la duración del periodo, por lo que es necesario que el convertidor trabaje a su máxima capacidad convirtiendo el voltaje generado a un valor digital.

El reloj de cristal que se empleo en el circuito es de 20 MHz, lo que representa un ciclo de trabajo interno del controlador de $0.2\mu\text{seg}$, donde el microcontrolador se tarda en convertir la señal análoga a digital en $2.2\mu\text{seg}$, suficiente para contrarrestar el error de conversión de la señal.

El diseño del circuito se traspaso a impreso, para montarlo en la prótesis, por lo que a continuación se muestra el circuito impreso del sistema electrónico.

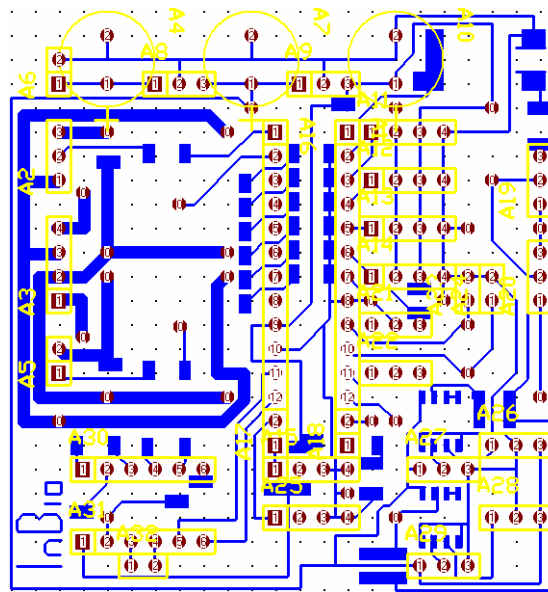


Figura 3.10. Circuito impresso.

La tarjeta diseñada tiene la capacidad de captar señales mioeléctricas en los pines de entrada del puerto A, sin embargo para este trabajo no se consideran, ya que la finalidad del prototipo es la automatización inteligente de la marcha.

El sistema armado se muestra a continuación.

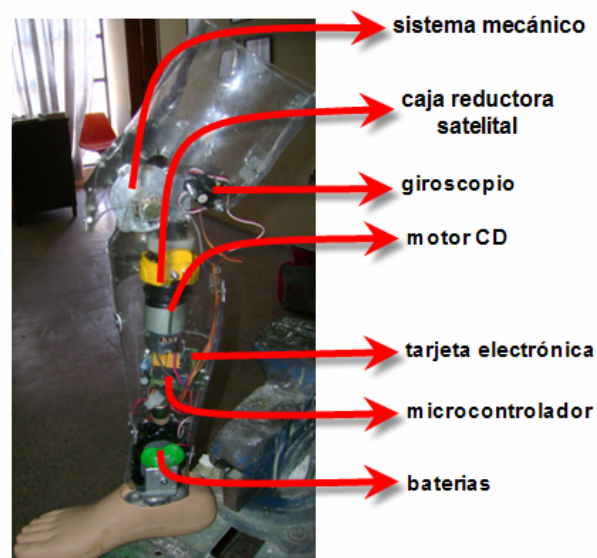


Figura 3.11. Partes de construcción del prototipo.

Las baterías usadas son divididas para alimentar independientemente a la tarjeta de control y al motor, este proceso se realiza para disminuir la posibilidad de ruidos generados por el motor, una batería suministra 7.2 volts para la tarjeta de control y la otra batería suministra 12 volts exclusivamente al motor.

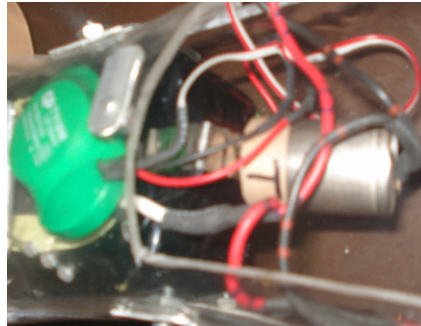


Figura 3.12. Baterías.

3.3 Software.

Antes debemos estudiar las características del giroscopio, ya que de el depende la entrada de nuestra variable en la fuzificación.

El giroscopio propuesto es un sensor que me da un ángulo en un plano por medio de la variación del voltaje salido del servomotor, ya que el denota una repeticiones de pulsos que se crea en su interior por medio del efecto hall, dando una señal PWM, el cual ayuda a saber con precisión lineal el ángulo formado.

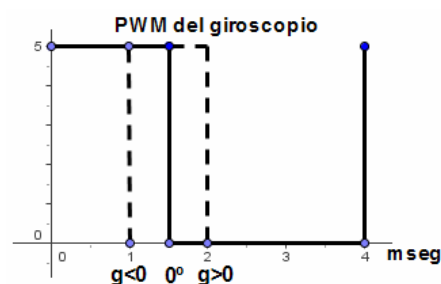


Figura 3.13. Señal PWM generada por el giroscopio.

La figura anterior nos muestra la salida del giroscopio, donde el pulso de trabajo se mueve de lado a lado, si esta crece los grados son positivos o existe una inclinación hacia arriba y si se mueve hacia la izquierda los grados son negativos o existe una inclinación para abajo, dicha señal es llevada a un mini servomotor que realiza una conversión de señal de PWM a una señal tipo senoidal. Por tal razón estudiaremos como se produciría la conversión de una señal analógica a digital, producida por nuestro sensor a la salida del servomotor, esto se realiza para tener conocimiento total de como serán los datos de entrada para nuestra fuzificación en el microcontrolador.

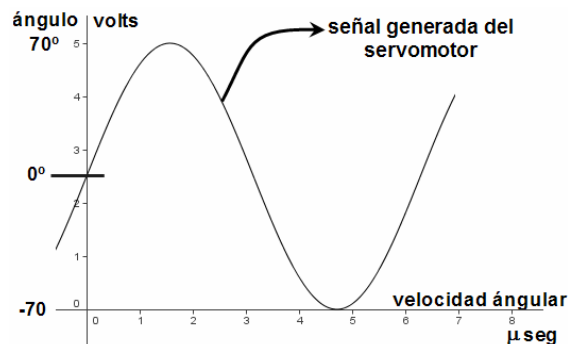


Figura 3.14. Señal analógica generada por el servomotor.

La señal entrante al microcontrolador se muestra en la figura anterior, donde se denota una amplitud en un rango de 0 a 5 volts que corresponde al ángulo, y por otro lado la velocidad esta dada por el tiempo de captura de la señal, que por la velocidad del microcontrolador esta se mide en microsegundos. Cabe mencionar que la señal es de tipo ideal, recordemos que la señal generada es de este tipo mientras se produce la inclinación, cuando el giroscopio deja de sensar la inclinación la señal cae a cero inmediatamente, por lo que es importante captar la señal en microsegundos para determinar cuanta inclinación existió antes de que esta se pare.

Para determinar el rango de las funciones de pertenencia, observemos primero la conversión generada después del ADC, datos obtenidos por la interfase del puerto serial:

Conversión a		
grados	voltaje	Decimal
70	5	1023
60	4.64285714	949.928571
50	4.28571429	876.857143
40	3.92857143	803.785714
30	3.57142857	730.714286
20	3.21428571	657.642857
10	2.85714286	584.571429
0	2.5	511.5
-10	2.14285714	438.428571
-20	1.78571429	365.357143
-30	1.42857143	292.285714
-40	1.07142857	219.214286
-50	0.71428571	146.142857
-60	0.35714286	73.0714286
-70	0	0

Tabla 1. Conversión del sensor a decimal.

Como habíamos dicho, nuestro control tendrá que ser capaz de examinar un rango de grados de 10° a -10° , por tanto también se examina este rango:

conversión a decimal		
grados		Forma entera
10	584.571429	584.000
9	577.264286	577.000
8	569.957143	569.000
7	562.65	562.000

6	555.342857	555.000
5	548.035714	548.000
4	540.728571	540.000
3	533.421429	533.000
2	526.114286	526.000
1	518.807143	518.000
0	511.5	511.000
-1	504.192857	504.000
-2	496.885714	496.000
-3	489.578571	489.000
-4	482.271429	482.000
-5	474.964286	474.000
-6	467.657143	467.000
-7	460.35	406.000
-8	453.042857	453.000
-9	445.735714	445.000
-10	438.428571	438.000

Tabla 2. Conversión en un rango de -10 a 10 grados.

Si observamos tenemos un rango de variación de 584 a 438 en nuestro valor digital, esto corresponde a un valor en ángulos reales, además también podemos realizar una nueva escala de valores para otorgar la correspondencia de cada una de los ángulos reales obtenidos, por tanto tenemos lo siguiente:

Conversión	grados	número real a tomar 584- 511=	Conversión	grados	número real a tomar	Conversión	grados	número real a tomar
584	10	73	533	3.013	22	482	-3.974	-29
583	9.863	72	532	2.876	21	481	-4.111	-30
582	9.726	71	531	2.739	20	480	-4.248	-31
581	9.589	70	530	2.602	19	479	-4.385	-32
580	9.452	69	529	2.465	18	478	-4.522	-33
579	9.315	68	528	2.328	17	477	-4.659	-34

578	9.178	67	527	2.191	16	476	-4.796	-35
577	9.041	66	526	2.054	15	475	-4.933	-36
576	8.904	65	525	1.917	14	474	-5.07	-37
575	8.767	64	524	1.78	13	473	-5.207	-38
574	8.63	63	523	1.643	12	472	-5.344	-39
573	8.493	62	522	1.506	11	471	-5.481	-40
572	8.356	61	521	1.369	10	470	-5.618	-41
571	8.219	60	520	1.232	9	469	-5.755	-42
570	8.082	59	519	1.095	8	468	-5.892	-43
569	7.945	58	518	0.958	7	467	-6.029	-44
568	7.808	57	517	0.821	6	466	-6.166	-45
567	7.671	56	516	0.684	5	465	-6.303	-46
566	7.534	55	515	0.547	4	464	-6.44	-47
565	7.397	54	514	0.41	3	463	-6.577	-48
564	7.26	53	513	0.273	2	462	-6.714	-49
563	7.123	52	512	0.136	1	461	-6.851	-50
562	6.986	51	511	-0.001	0	460	-6.988	-51
561	6.849	50	510	-0.138	-1	459	-7.125	-52
560	6.712	49	509	-0.275	-2	458	-7.262	-53
559	6.575	48	508	-0.412	-3	457	-7.399	-54
558	6.438	47	507	-0.549	-4	456	-7.536	-55
557	6.301	46	506	-0.686	-5	455	-7.673	-56
556	6.164	45	505	-0.823	-6	454	-7.81	-57
555	6.027	44	504	-0.96	-7	453	-7.947	-58
554	5.89	43	503	-1.097	-8	452	-8.084	-59
553	5.753	42	502	-1.234	-9	451	-8.221	-60
552	5.616	41	501	-1.371	-10	450	-8.358	-61
551	5.479	40	500	-1.508	-11	449	-8.495	-62
550	5.342	39	499	-1.645	-12	448	-8.632	-63
549	5.205	38	498	-1.782	-13	447	-8.769	-64
548	5.068	37	497	-1.919	-14	446	-8.906	-65
547	4.931	36	496	-2.056	-15	445	-9.043	-66
546	4.794	35	495	-2.193	-16	444	-9.18	-67
545	4.657	34	494	-2.33	-17	443	-9.317	-68
544	4.52	33	493	-2.467	-18	442	-9.454	-69
543	4.383	32	492	-2.604	-19	441	-9.591	-70
542	4.246	31	491	-2.741	-20	440	-9.728	-71

541	4.109	30	490	-2.878	-21	439	-9.865	-72
540	3.972	29	489	-3.015	-22	438	10.002	-73
539	3.835	28	488	-3.152	-23			
538	3.698	27	487	-3.289	-24			
537	3.561	26	486	-3.426	-25			
536	3.424	25	485	-3.563	-26			
535	3.287	24	484	-3.7	-27			
534	3.15	23	483	-3.837	-28			

Tabla 3. Conversión del rango de -10 a 10 grados en cada incremento digital.

Una vez comprendiendo el valor aproximado de los ángulos que va a tomar nuestro sistema, podemos realizar una estandarización de nuestras gráficas de fuzificación.

3.4 Diseño del control difuso.

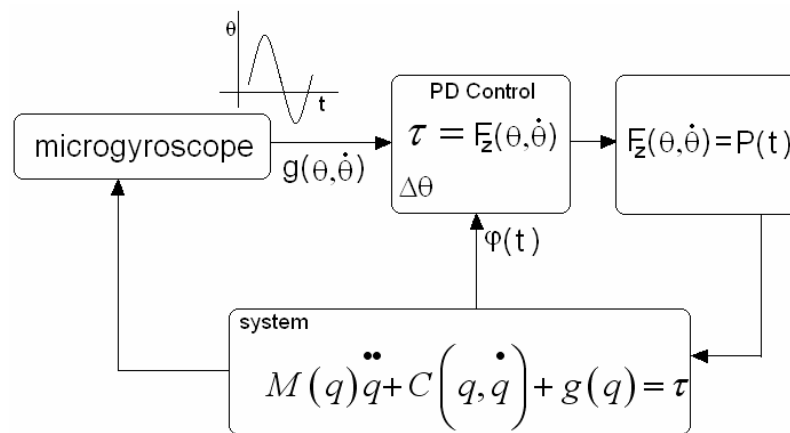


Figura 3.15. Diagrama a bloques del control difuso.

El diagrama a bloques descrito en la anterior figura, se ilustra la salida del giroscopio dando como entrada al microcontrolador dos entradas dadas por el ángulo θ y su velocidad $\dot{\theta}$ siendo estas las entradas del control difuso PD, a la salida es este, nos da una función determinada por las dos variables para la salida de potencia del motor, el cual le da movilidad al sistema, denotando que el sistema

tiene dentro de si una matriz de inercia, disminuida por el diseño de la mecánica y controlada por la lógica difusa, después de estas atribuciones los nuevos parámetros del sistema no son más conocidos, además de que existe como salida extra del sistema un señal de límites de movimiento de extensión y flexión denota por $\varphi(t)$.

3.4.1 Fuzificación de las variables.

Por lo anterior tomamos una gráfica de fuzificación la cual tiene una escala de no más de dos decimales, de esta forma proponemos, la siguiente gráfica con sus correspondientes términos lingüísticos.

Fuzificación de los grados:

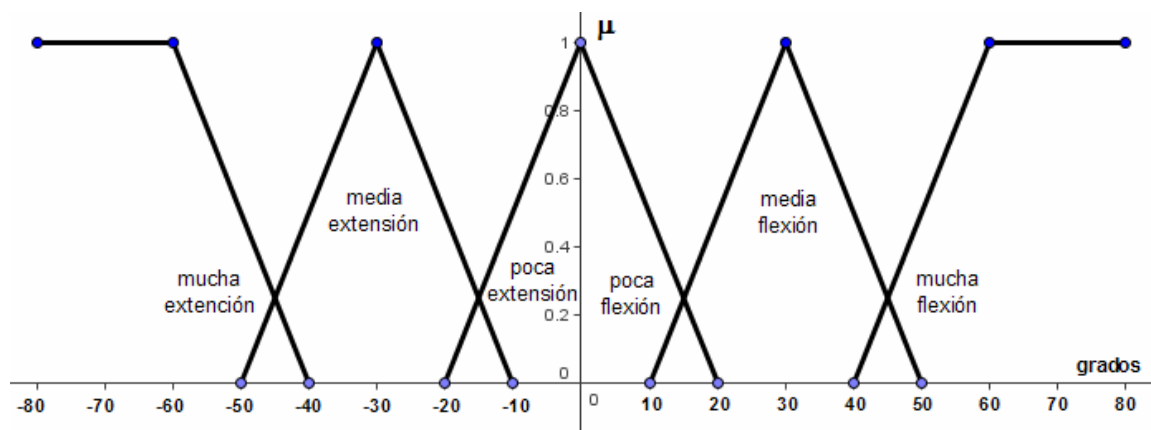


Figura 3.16. Fuzificación de grados.

Si nosotros encontramos las pendientes de cada una de las caídas de nuestras gráficas encontraremos que todas son iguales, por lo tanto el incremento unitario que se mueva en el rango de -80 a 80 se verá restringido por una pendiente, recordando también que nuestra escala que arrojó nuestro sensor fue de 73 a -73.

Por tanto, un estudio de las pendientes y de los valores que arrojaría sería de la siguiente manera:

Pendiente de la función de pertenencia de muy bajo

$$\mu_1 = -(1/20)(x + 40)$$

Pendiente positiva Pendiente negativa

$$\mu_2 = (1/20)(x + 50) \quad \mu_2 = -(1/20)(x + 10)$$

de la función de pertenencia de bajo

muy bajo			bajo			bajo		
x	x+40	Pertenencia	x	X+50	pertenencia +	x	x+10	Pertenencia -
-60	-20	1	-50	0	0	-30	-20	1
-59	-19	0.95	-49	1	0.05	-29	-19	0.95
-58	-18	0.9	-48	2	0.1	-28	-18	0.9
-57	-17	0.85	-47	3	0.15	-27	-17	0.85
-56	-16	0.8	-46	4	0.2	-26	-16	0.8
-55	-15	0.75	-45	5	0.25	-25	-15	0.75
-54	-14	0.7	-44	6	0.3	-24	-14	0.7
-53	-13	0.65	-43	7	0.35	-23	-13	0.65
-52	-12	0.6	-42	8	0.4	-22	-12	0.6
-51	-11	0.55	-41	9	0.45	-21	-11	0.55
-50	-10	0.5	-40	10	0.5	-20	-10	0.5
-49	-9	0.45	-39	11	0.55	-19	-9	0.45
-48	-8	0.4	-38	12	0.6	-18	-8	0.4
-47	-7	0.35	-37	13	0.65	-17	-7	0.35
-46	-6	0.3	-36	14	0.7	-16	-6	0.3
-45	-5	0.25	-35	15	0.75	-15	-5	0.25
-44	-4	0.2	-34	16	0.8	-14	-4	0.2
-43	-3	0.15	-33	17	0.85	-13	-3	0.15
-42	-2	0.1	-32	18	0.9	-12	-2	0.1
-41	-1	0.05	-31	19	0.95	-11	-1	0.05
-40	0	0	-30	20	1	-10	0	0

Tabla 4. Estudio de las pendientes en las funciones de pertenencias.

Si se dan cuenta en la tabla generada de las diferentes funciones de pertenencias de nuestros términos lingüísticos, existe algo en común, al realizar la suma se crea una secuencia de números que se repite para cada pendiente y esta varía de 0 a 20 en su valor absoluto a la cual llamaremos localidad, esta localidad corresponde a una pertenencia característica que varía de 0 a 1 con dos decimales de exactitud, para que esto pueda tomarse como entero bastará multiplicar la pertenencia por 100 para tomar todo el valor, lo que nos arroja operaciones muy sencillas para realizar nuestro diagrama de flujo de como sería nuestro software para fuzificar nuestro ángulo.

De todo esto que hemos observado podemos realizar un diagrama de flujo de como podría ser nuestro código en PIC para una fuzificación de este tipo.

Escribimos pues:

Diagrama de flujo

per[mb] = pertenencia de mucha extensión

per[b] = pertenencia de media extensión

per[e] = pertenencia de poca flexión o poca extensión.

per[a] = pertenencia de media flexión

per[ma] = pertenencia de mucha flexión

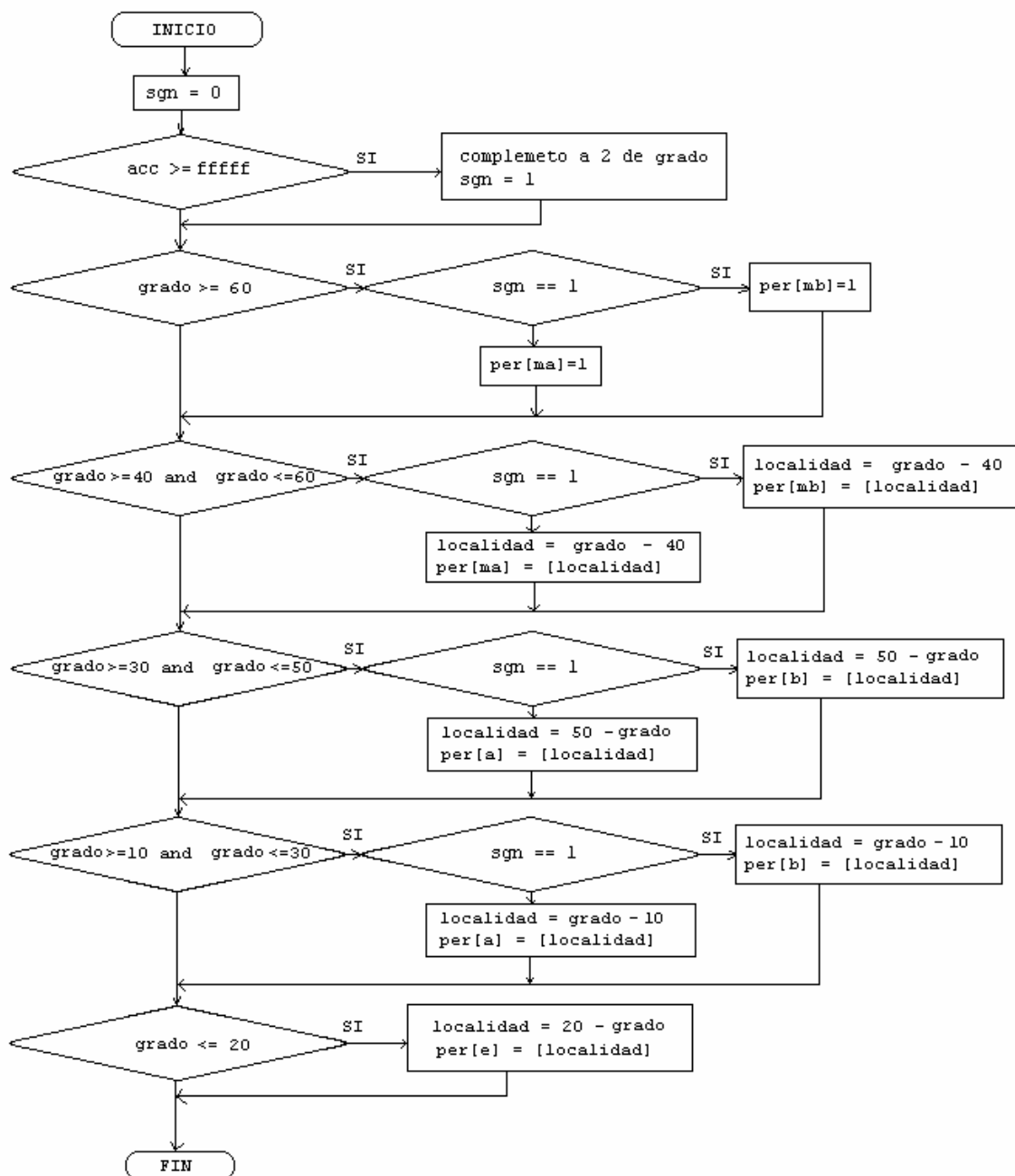


Figura 3.17. Diagrama de flujo de la fuzzificación de grados.

Con la siguiente tabla de localidades de memoria:

localidad de memoria	pertenencia
f000	0
f001	5
f002	10
f003	15
f004	20
f005	25
f006	30
f007	35
f008	40
f009	45
f00a	50
f00b	55
f00c	60
f00d	65
f00e	70
f00f	75
f010	80
f011	85
f012	90
f013	95
f014	100

Tabla 5. Localidades de memoria para las funciones de pertenencia de los grados.

La tabla de localidad de memoria se utiliza para almacenar las pertenencias de cada palabra lingüística, de tal manera que si nosotros proponemos otra gráfica de fuzificación podemos agrandar la precisión tanto como nosotros lo necesitemos.

Pasando ahora a la fuzificación de la velocidad de cambio del error del ángulo tenemos lo siguiente. Empezando por su gráficas de pertenencia.

Fuzificación de la velocidad de cambio de los grados.

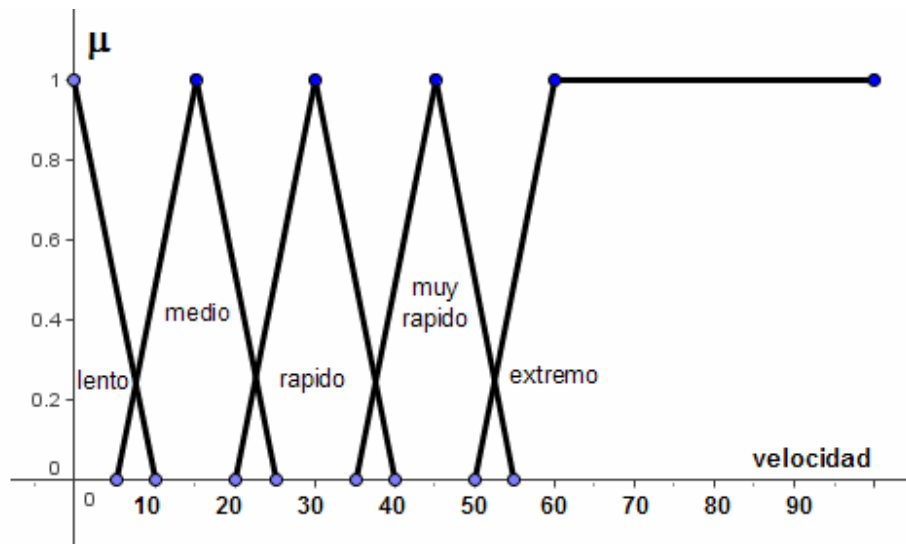


Figura 3.18. Funciones de pertenencia para la velocidad de cambio de los grados.

Lo que se realiza a continuación es el calculo de las pendientes y de esta forma obtener las ecuaciones de dos primeras de ellas, tal y como lo realizamos en la fuzificación del error del ángulo.

A estas gráficas la pendiente es diferente : $m = 1/10$

Pendiente de la función de pertenencia de lento

$$\mu_1 = -(1/10)(x - 10)$$

Pendiente positiva Pendiente negativa

$$\mu_2 = (1/10)(x - 5) \quad \mu_2 = -(1/10)(x - 25)$$

de la función de pertenencia medio

lento			medio			medio		
			pertenencia			pertenencia		
x	x-10	pertenenciaX	x-5	+	x	x-25	-	
0	-10	1	5	0	0	15	-10	1
1	-9	0.9	6	1	0.1	16	-9	0.9
2	-8	0.8	7	2	0.2	17	-8	0.8
3	-7	0.7	8	3	0.3	18	-7	0.7
4	-6	0.6	9	4	0.4	19	-6	0.6
5	-5	0.5	10	5	0.5	20	-5	0.5
6	-4	0.4	11	6	0.6	21	-4	0.4
7	-3	0.3	12	7	0.7	22	-3	0.3
8	-2	0.2	13	8	0.8	23	-2	0.2
9	-1	0.1	14	9	0.9	24	-1	0.1
10	0	0	15	10	1	25	0	0

Tabla 6. Estudio de las pendientes en las funciones de pertenencia de la velocidad de cambio de los grados.

Si observan con las ecuaciones, lo que se crea es la misma secuencia de la que nos percatamos en la fuzificación del error del ángulo, por lo que utilizaremos la misma tabla generada, tan solo para este caso en particular cambia los límites de las pendientes, por lo que tenemos en el diagrama de flujo:

Diagrama de flujo

per[l] = pertenencia de lento

per[m] = pertenencia de medio

per[r] = pertenencia de rápido

per[mr] = pertenencia de muy rápido

per[ex] = pertenencia de extremo

Al final multiplicar la pertenencia por 10 para que se encuentre en la misma magnitud que en la pertenencia de la fuzificación de los grados

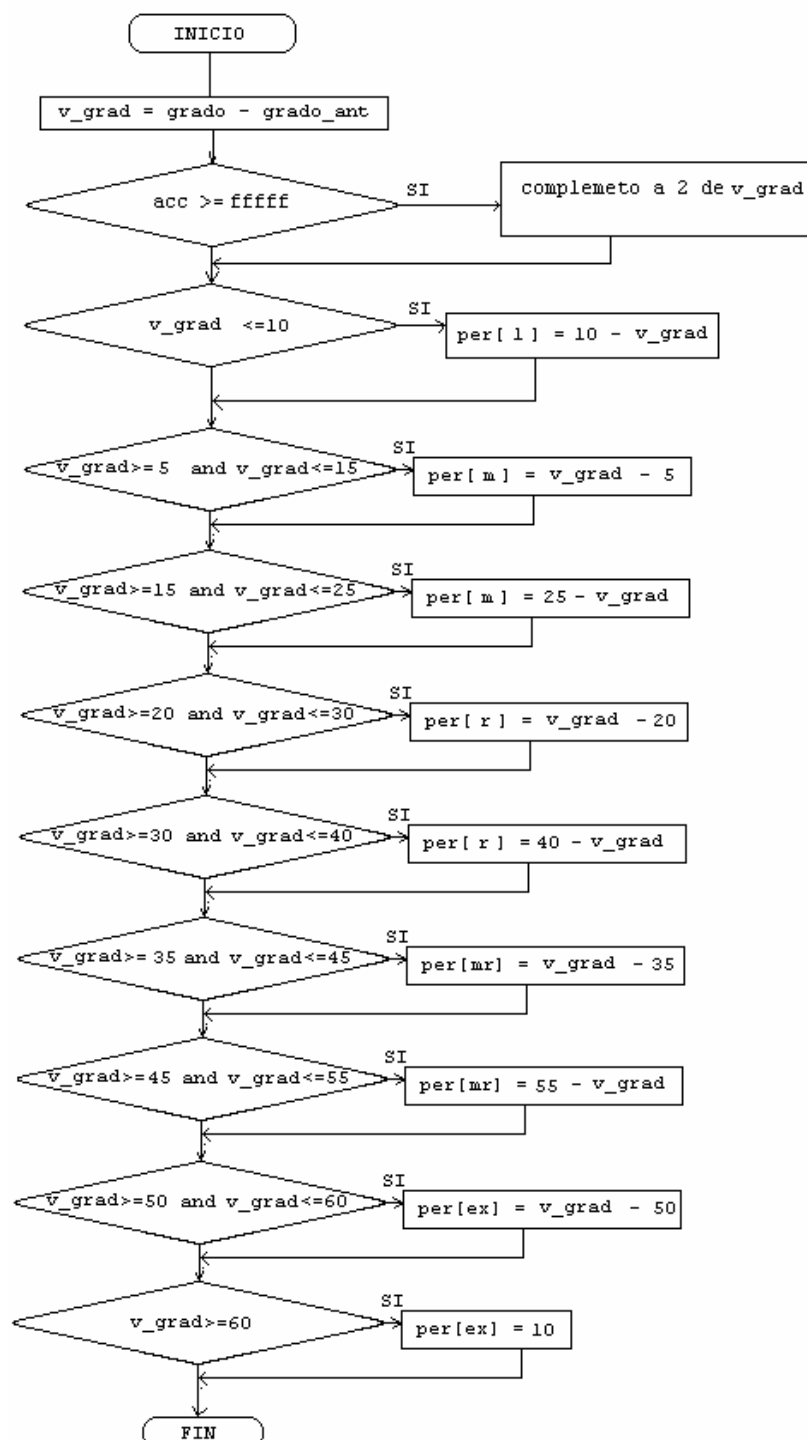


Figura 3.19. Diagrama de flujo de las funciones de pertenencia de la velocidad de cambio de los grados.

3.4.2 Reglas de inferencia.

Ahora que ya tenemos la fuzificación de nuestras entradas, lo que ahora sigue son las reglas de inferencia; las cuales las mostraremos en una tabla de decisión junto con las graficas de nuestros términos lingüísticos para la salida de nuestra Q, que es el porcentaje de trabajo en el periodo del pulso PWM.

Donde Q esta dado por:

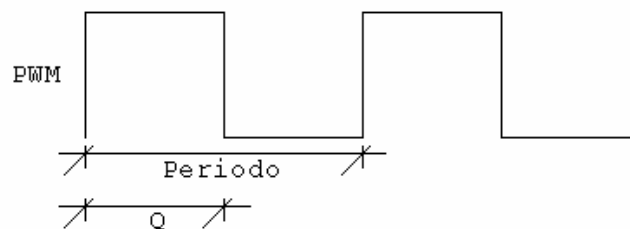


Figura 3.20. Existencia de Q en el pulso PWM

Para implementar todo lo anterior lo que se recomienda para la obtención de Q es lo siguiente, es el método conocido por centroide, lo que significa tomar los mínimos de los máximos de las pertenencias de salida multiplicadas por el centroide, que es el centro de cada una de nuestras funciones para defuzificar; estas funciones son otorgadas por términos lingüísticos, y los resultados son otorgados por medio de las reglas de inferencia, que son las decisiones que se toman cuando tenemos una combinación de pertenencias en nuestras gráficas de fuzificación.

Por tal razón proponemos los siguientes centroides:

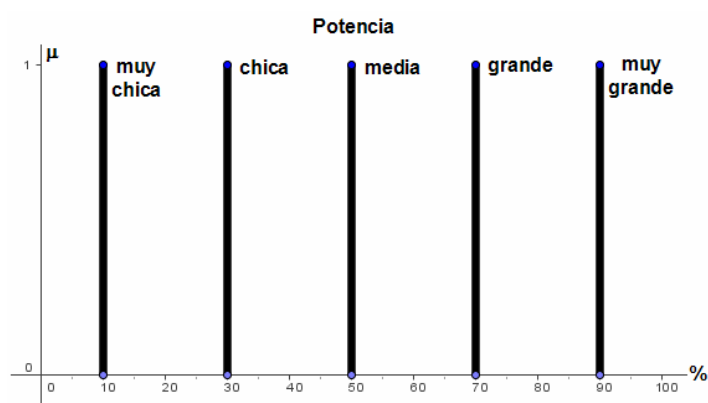


Figura 3.21. Centroides.

Si ahora ya tenemos definido nuestros centroides, unas reglas de inferencia que dieron resultado en nuestra simulación fueron las siguientes, recordemos que estas son las culpables de como sea nuestra salida de Q ya que aquí decidimos por que centroide se multiplica.

	LENTO	MEDIO	RAPIDO	M. RAPIDO	EXTREMO
MUY BAJO	muy grande	muy grande	muy grande	Grande	grande
BAJO	muy grande	Grande	grande	Grande	media
EQUILIBRADO	media	media	media	media	media
ALTO	Muy chica	Chica	chica	Chica	media
MUY ALTO	muy chica	muy chica	muy chica	chica	Chica

Tabla 7. Reglas de inferencia encontradas.

3.4.3 Defuzificación.

Para escoger las funciones de pertenencias de cada uno de los casos se realiza un defuzificación la cual no dará el valor correspondiente para la salida de nuestra potencia por tal razón se toman las siguientes operaciones.

Operación OR [AND] difusa para las pertenencias de las entradas:

$$\text{Min} [\text{per}(e_frec) \text{ and } \text{per}(v_frec)] = \text{per} (\text{salida})$$

Una vez obtenido lo anterior la Q se obtiene mediante la ecuación:

$$Q = \frac{\sum \text{per}(\text{salida}) \cdot \text{centroide}}{\sum \text{per}(\text{salida})}$$

El código queda de la siguiente forma en su parte del control robusto:

```
void adc_giro(void){
    // obtención de datos del giroscopio
    SetChanADC( ADC_CH0 );
    ConvertADC();           // Start conversion
    while(BusyADC());       // Wait for completion
    dato = ReadADC();       // Read result

    //inicializacion de parametros de control difuso
    flex=0;
    ext=0;
    pcflex=0;
    pcext=0;
    mdflex=0;
    mdext=0;
    mcflex=0;
    mcext=0;

    //codigo de control difuso de entrada, decisión difusa
    if(dato<(medio-(i*3))){    flex=1; mcflex=1;    }
    if(dato<(medio-(i*2))){    flex=1; mdflex=1;    }
    if(dato<(medio-i)){        flex=1; pcflex=1;    }

    if(dato>(medio+(i*3))){    ext=1; mcext=1;    }
    if(dato>(medio+(i*2))){    ext=1; mdext=1;    }
    if(dato>(medio+i)){        ext=1; pcext=1;    }

    if(mcflex==1){            mdflex=0;    pcflex=0;    }
    if(mdflex==1)              pcflex=0;
```

```

        if(mcext==1){          mdext=0;      pcect=0;      }
        if(mdext==1)           pcect=0;
    }

void mover(void){
int salir=0;
int conta=0;

                                //codigo de control difuso de salida, tiempo de movimiento
    if(flex==1){
        if(mcflex)              tiempo=t*3;
        if(mdflex)              tiempo=t*2;
        if(pcflex)              tiempo=t*1;
        while(salir==0){
            if(PORTCbits.RC0==0){
                salir=1;          //checa limite de movimiento
                adc_pot();
                if(dato>460){      //estoy en limite de extencion
                    salir=0;
                    PORTBbits.RB6=1; //flexiona con la rodilla
                    while(PORTCbits.RC0==0);
                }
            }
            PORTBbits.RB6=1;      //flexiona con la rodilla
            conta++;
            if(conta>tiempo)      salir=1;    //checa finalización de tiempo
        }
        PORTBbits.RB6=0;        //detener la flexion con la rodilla
    }

    if(ext==1){
        if(mcext)                tiempo=t*3;
        if(mdext)                tiempo=t*2;
        if(pcect)                tiempo=t*1;
        while(salir==0){
            if(PORTCbits.RC0==0){
                salir=1;          //checa limite de movimiento
                adc_pot();

```

```

        if(dato<400){                                //estoy en limite de flexion
            salir=0;
            PORTBbits.RB7=1;    //extiende con la rodilla
            while(PORTCbits.RC0==0);
        }
    }
    PORTBbits.RB7=1;                                //extiende con la rodilla
    conta++;
    if(conta>tiempo)    salir=1;    //checa finalización de tiempo
}
PORTBbits.RB7=0;                                    //detener la extencion con la rodilla
}
}

```

Esto es tan solo para la primera línea de nuestras reglas de inferencia, donde nosotros conjugamos la pertenencia de muy bajo con respecto al error del ángulo con las pertenencias de lento, medio, rápido, muy rápido, y extremo de la velocidad del error del ángulo, además de escribir las salidas que corresponden que en este caso fue en el orden de muy grande, grande, potencia media, chico, muy chico para la salida de nuestra potencia.

Si nosotros queremos escribir lo demás quedaría de igual forma, tan solo se cambian las entradas y las salidas que correspondan a la regla que se este tratando, además de multiplicar por su centroide correspondiente.

De la misma forma que al final de cada regla de inferencia se calcula num, y den; los cuales nos darán el porcentaje de nuestra Q que es el ciclo de trabajo del pulso PWM, al finalizar con todas las reglas estas se dividen.

$$Q = \text{num} / \text{den}$$

A este porcentaje no se le tiene que hacer nada ya que este queda en un rango de 0 a 100, que corresponde a los valores de pertenencia que propusimos al inicio en nuestra defuzificación, y por lo tanto este queda de igual forma en donde corresponde al porcentaje deseado del nuestro ciclo de trabajo en el PWM.

3.5 Estabilidad difusa.

Tradicionalmente el análisis de estabilidad determina lo viable que es un control en un sistema, además de que convencionalmente el análisis de estabilidad esta basado sobre el modelo matemático de el sistema a controlar, pero en el control difuso difiere, ya que su principal ventaja que se tiene en este tipo de control es en el no regirse por el modelo dinámico del sistema.

Nos basaremos en un estudio realizado por E. H. Mamdani, en su artículo “Applications of Fuzzy Set Theory to Control Systems” donde se va observando la evolución en la matriz generada por las reglas de inferencia y los centroides escogidos en el control difuso por medio de sus entradas.

Este proceso es seguido por los autores Kiszka, Hwang y Lin, Tanaka y Sugeno, y además de Singh principalmente entre otros. Los que nos muestran es el como esperar un análisis de estabilidad a partir de una lógica lingüística que describe un sistema dinámico, por medio de un criterio de estabilidad en los términos lingüísticos.

Entendamos que una ecuación de un sistema dinámico difuso tiene la forma:

$$X_{K+1} = X_K \bullet U_K \bullet R \quad \text{para toda} \quad K = 0,1,2,3...$$

Donde X son los estados que se tienen con respecto a las decisiones difusas que se dan en el controlador difuso en un tiempo k, y U es la entrada en un instante k y R es la regla de inferencia difusa entre la entrada y la salida.

En un sistema dinámico se empieza a denotar estabilidad poniendo la entrada en cero, para nuestro caso es lo similar.

$$X_{K+1} = X_K \bullet P$$

Donde:

El equilibrio se alcanza si los estados en X son iguales para toda K

$$P = U_K \bullet R \quad \text{donde} \quad U_K = 0 \quad \text{para toda} \quad K = 0,1,2,3\dots$$

$$X_S = X_S \bullet P$$

Varios autores ingresan algoritmos para observar el comportamiento, tal y como nosotros observamos las trayectorias de nuestro sistema, sin embargo se recomienda usar un algoritmo basado en la energía del sistema. Un sistema dinámico es estable si su energía es mínima y constante, es inestable si su energía incrementa con el tiempo, y es oscilatorio si fluctúa con el tiempo.

Se propone un promedio de la energía con respecto a las reglas de inferencia que es el núcleo de enlace entre las entradas y las salidas, estos definen la energía como sigue:

$$E(P) = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m w(x_i, y_j) \bullet f(\mu_P(x_i, y_j))$$

Donde w es la función que señala las reglas de inferencia en todo el universo de discusión, f es la función de las pertenencias que se toman con respecto a las reglas de inferencia.

En conclusión la estabilidad por medio de la energía otorgada por el programa ESA de Kiszka, tiene las siguientes consideraciones:

$$\Delta E(P^i) = \Delta E(P^i) - \Delta E(P^{i-1})$$

Si $\Delta E(P^i) \leq 0$ en $i = \infty$, entonces el sistema es estable

Si $\Delta E(P^i) > 0$ en $i = \infty$, entonces el sistema es inestable

Si $|\Delta E(P^i)| = |\Delta E(P^{i-t})|$ en $i = \infty$, el sistema es oscilatorio con frecuencia $\frac{1}{t}$

Realizando el algoritmo que nos permita realizar el cálculo de las energías a nuestro proyecto nos dio lo siguiente:

$P =$

Columns 1 through 7

0.0112 0.0052 0.0002 0 0 0

Columns 8 through 10

0 0 0

Inmediatamente después del cuarto cálculo de la sumatoria dada, se denota que $\Delta E = 0$, por lo que el sistema es estable.

Capítulo Cuatro.

Resultados, recomendaciones y conclusiones.

4.1 Resultados de la construcción de la mecánica.



El sistema mecánico tiene un peso aproximado de 2 kilogramos, para definir cuanto peso puede la pierna soportar se extrajo el sistema de los reductores, y se calculo por medio de una palanca de aproximadamente de 40 cm de longitud, el

peso que se añadió al motoreductor a esa distancia fue de 5 kilogramos, donde el sistema tuvo complicaciones para mover el peso, sin embargo o pudo soportar.

Con un simple análisis se puede obtener un análisis de la fuerza que tiene el motoreductor.

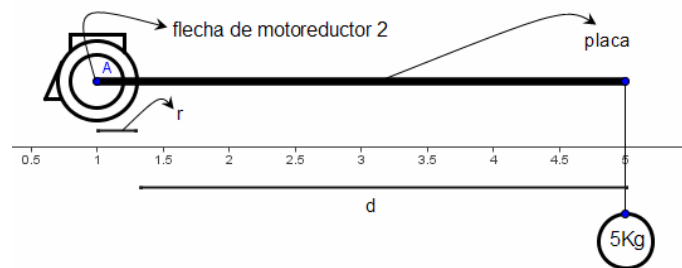


Figura 4.1 Fuerza de palanca en la flecha del segundo reductor.

De la figura anterior se puede calcular la fuerza del momento por medio de:

$$F = \frac{(D * d)}{r}$$

Donde D es el valor aproximado del peso de 5 kilogramos, r mide aproximadamente 0.05m y la distancia d es de 0.4m, por lo tanto tenemos lo siguiente:

$$D = 5 * 9.81 = 49,05 \text{ N}$$

$$F = \frac{49.05 * 0.4}{0.05} = 392,4\text{N}$$

Por lo que los resultados señalan que el sistema puede soportar un exceso de carga al mover la pierna con un rango lo suficientemente aceptable para que el sistema lo pueda implementar un protesista a un paciente, sin correr el riesgo de fallas, recordemos que mientras el sistema no esta en movimiento el sistema mecánico con el reductor de sin fin con el engrane recto traba el mecanismo

dejándolo capaz de usar a la prótesis como un apoyo, el riesgo que se corre en el sistema es que el engrane helicoidal con el engrane sin fin en un apoyo lo suficientemente grande, pueda dañar el diámetro de paso de los dientes, sin embargo el peso debe exceder mucho el peso del paciente, hablando de una persona adulta de 100 kilogramos, ya que los engranes antes mencionados y la flecha de salida del segundo reductor son de acero, en excepción del engrane helicoidal que es de naylamil.

El mantenimiento del sistema mecánico es relativamente rápido, el motor de DC es un motor comercial y de fácil adquisición, la primera caja reductora con sus planetarios es el sistema más complejo, sin embargo se pueden adaptar varias cajas reductoras del tipo, ya que el primer acople de esta caja con la segunda es muy simple como se muestra a continuación:

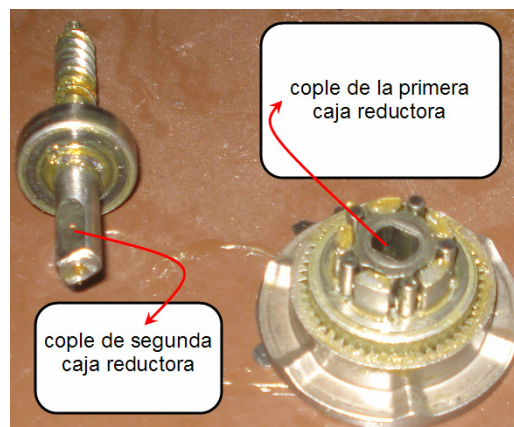


Figura 4.2. Unión de cajas reductoras

La segunda caja reductora es un reductor de una transmisión empleada en la automatización de procesos industriales, el sistema es muy común encontrarlo en refacciones de bandas transportadoras y de cambios direccionales de material, sin embargo se le recomienda al lector que todos los engranes deben ser diseñados y producidos por medio de maquinaria como torno y fresa para tener refacciones disponibles inmediatas.

4.2 Resultados de la construcción de la electrónica.

La tarjeta fue diseñada en un simulador y construida según los resultados obtenidos, la construcción de la tarjeta del primer diseño fue funcional en un 100%, la modificación en el diseño fue externa, al determinar dos tipos diferentes de fuentes de energía una para la tarjeta electrónica y otro solamente para el motor.

La tarjeta electrónica terminada se muestra a continuación.

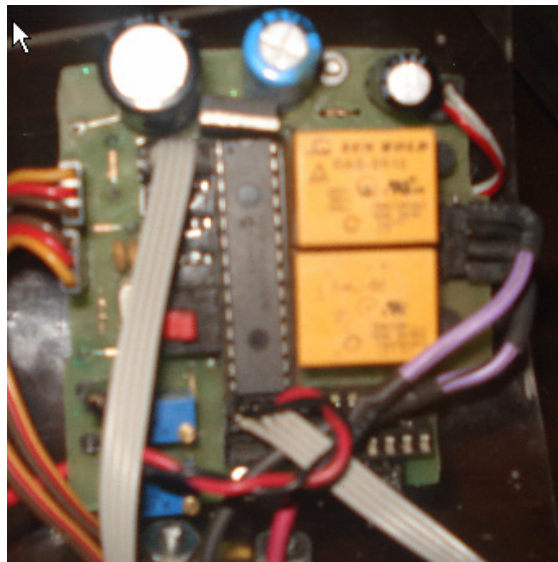


Figura 4.3. Tarjeta electrónica

Los ruidos presentados en la tarjeta se presentaron en la transmisión de la señal del servomotor a la tarjeta electrónica, entendamos que en realidad la señal que entra al microcontrolador es un punto máximo o mínimo de la señal senoidal, que puede ser muy perceptible al ruido generado por el campo magnético del motor, es decir la señal que realmente entra en el microcontrolador es:

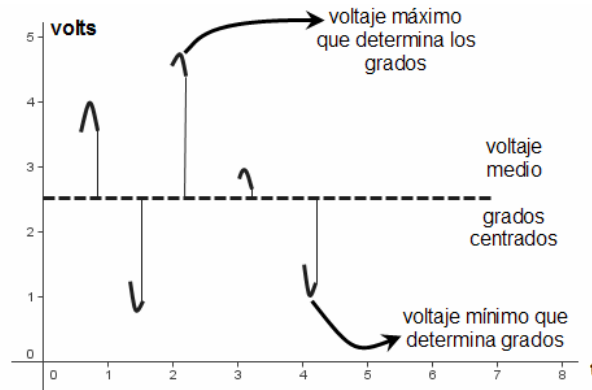


Figura 4.4. Captación de señal por el microcontrolador

La señal determinada con mayo intensidad en la figura, es muy susceptible al ruido, cada pico es muy importante captarlo para saber cuanto mover la rodilla, para resolver el problema suscitado, se realizaron varios pasos, que se describen a continuación:

1. Hacer un ciclo infinito de sensado de la señal.
2. Parar completamente o cortar la energía al motor de DC.
3. Al captar la señal realizar los cálculos pertinentes.
4. Mandar el mando de control y dirección al motor.
5. Dejar de sensar.
6. Parar completamente o cortar la energía al motor de DC.
7. Volver a realizar el ciclo infinito de sensado de la señal.
8. Ir al paso 3.

Con estos pasos se pudo captar sin error la señal, ya que el motor no llega a interferir en el sensado de la señal porque mientras se transmite este se encuentra apagado. Otra solución es el migrar la tarjeta electrónica hacia arriba de la prótesis, sin embargo se desperdiciaría espacio en el socket.

4.3 Conclusiones

Capacidades funcionales esperadas.

La amputación del miembro inferior interfiere las funciones de apoyo cuando esté de pie y con las de propulsión y elevación del cuerpo, andando, corriendo y en las actividades necesarias para subir y bajar escaleras, cuestas, obstáculos, en terreno irregular y en elevar y transportar objetos.

Las limitaciones de estas funciones están en relación con el nivel de amputación, del tipo de prótesis que se pueda adaptar y el estado del miembro sano. Como el nivel de amputación lo dicta la naturaleza del accidente traumático o la gravedad del desorden vascular y otras circunstancias, la elección de la longitud del muñón es relativa. La utilidad que puede obtenerse de la prótesis puede estar favorablemente influida por la adecuada prescripción protésica de la revisión de la correcta adaptación de la habilidad del protésico y de la calidad y extensión del entrenamiento en el uso de la prótesis.

Las capacidades funcionales del amputado por encima de la rodilla están determinadas, en gran parte, por la potencia con la que el amputado puede controlar la rodilla protésica. La estabilidad de la rodilla se lleva a cabo a través del alineamiento mecánico y por la acción de los extensores de la cadera, que pueden oponerse a la flexión y fuerzan la rodilla hacia atrás, hacia la extensión.

Si duda alguna, si el paciente es un candidato sin ninguna contrariedad en manejar una prótesis, el sistema tiene muchas posibilidades de ser útil a pacientes que tienen esa desafortunada aventura y que en un tiempo no muy lejano el poder introducir un sistema de sensado al músculo y a los movimientos del mismo sistema podrán tener un sistema inteligente para la implementación de prótesis mioelectrónicas - pizoelectricas al alcance de pacientes mexicanos.

FutabaRate Gyro for Small Electric
Powered Helicopters

Before using your new gyro, please read this manual thoroughly and use the gyro properly and safely. After reading this manual, store it in a safe place.

- No part of this manual may be reproduced in any form without prior permission.
- The contents of this manual are subject to change without prior notice.
- This manual has been carefully written. Please write to Futaba if you feel that any corrections or clarifications should be made.

Thank you for purchasing a G190 gyro, a rate gyro for small electric powered helicopters. G190 is a small and light-weight gyro with high-performance, employing small size piezoelectric sensor of little temperature drift. In addition, the G190 unit is well deigned as any side of its case can be used for easy and stable mounting.

Features of G190

• Small piezoelectric sensor

G190, utilizing a small piezoelectric sensor of little temperature drift, has achieved a very stable performance.

• Small, light-weight and all-in-one

Our high-density assembly technology has made it possible for G190 to become very small (22.2x22.8x8.9mm, excluding protrusions) and light-weight (6.7g).

• Newly designed case capable of using any side of the case for mounting

The newly designed case, any side of which can be used for mounting, is very small and highly flexible for being correctly positioned and correctly oriented on the limited space of a small-size electric powered helicopter. Consequently G190 can maximize its gyro performance.

• Applicable to the micro servo S3108

Combination of G190 and S3108 micro servo would further reduce the total weight.

Special Markings;

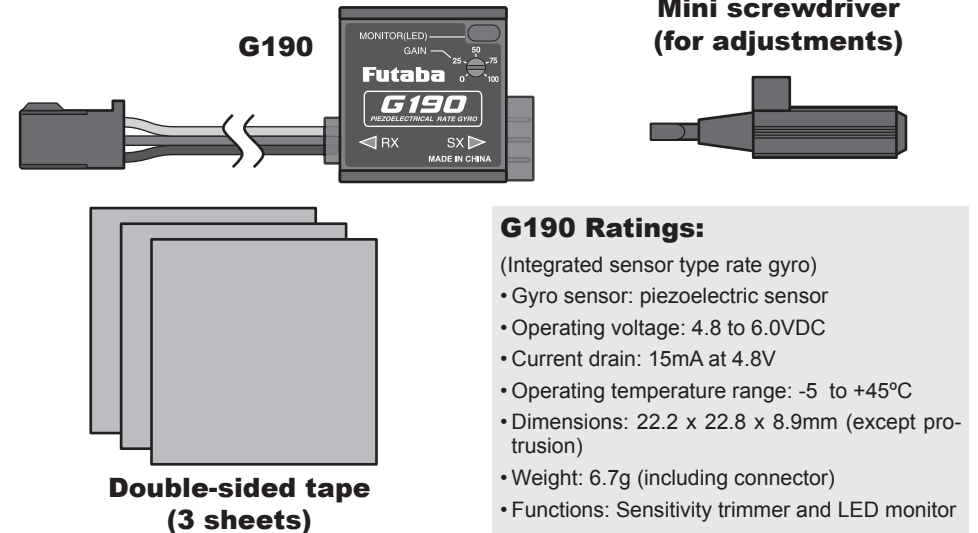
Pay special attention to the safety at the parts of this manual that are indicated by the following marks.

Symbol: ; Prohibited
 ; Mandatory

Mark	Meaning
DANGER	Procedures which may lead to a dangerous condition and cause death or serious injury to the user if not carried out properly.
WARNING	Procedures which may lead to a dangerous condition or cause death or serious injury to the user if not carried out properly, or procedures where the probability of superficial injury or physical damage is high.
CAUTION	Procedures where the possibility of serious injury to the user is small, but there is a danger of injury, or physical damage, if not carried out properly.

Set Contents

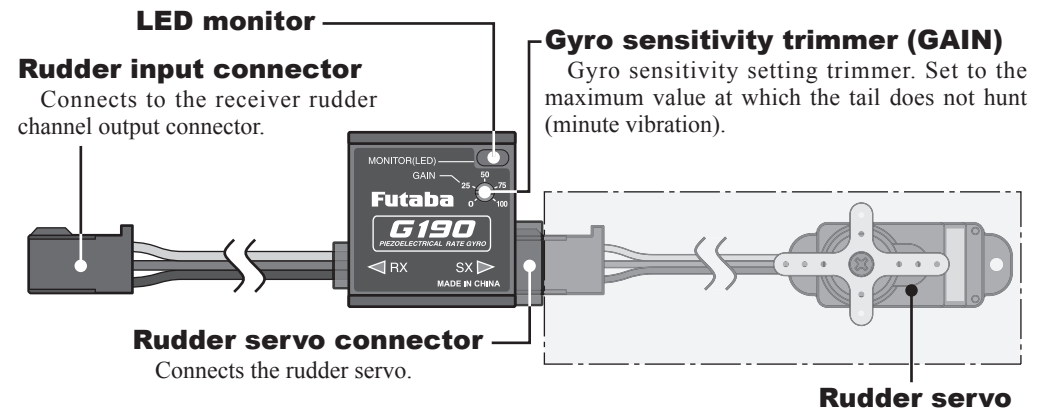
The G190 comes with the following accessories:



G190 Ratings:

- (Integrated sensor type rate gyro)
- Gyro sensor: piezoelectric sensor
 - Operating voltage: 4.8 to 6.0VDC
 - Current drain: 15mA at 4.8V
 - Operating temperature range: -5 to +45°C
 - Dimensions: 22.2 x 22.8 x 8.9mm (except protrusion)
 - Weight: 6.7g (including connector)
 - Functions: Sensitivity trimmer and LED monitor

Functions and Connections



LED monitor:

- **Quick Blinking:** The LED continues blinking quickly as the initialization of the G190 automatically starts immediately after the power is turned on.
- **Always On:** As soon as the initialization is completed, the LED turns on continuously and G190 is ready for operation.
- **Slow Blinking (about 1Hz):** If the G190 receives any abnormal signal from the receiver, the LED starts slow blinking.

Mountings and Adjustments

This section describes how to use the G190. Mount and adjust the G190 as described below.

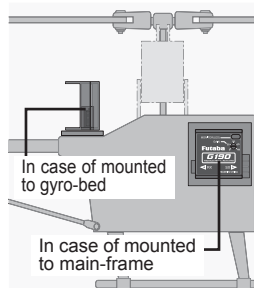
Trimmer Operation

- To make the G190 small and light-weight, a small trimmer is also used. Be careful when operating the trimmer. Always operate the trimmer with the mini screwdriver supplied.

Mounting to Fuselage

1 Using the attached double-sided sponge tape, attach the G190 temporarily to the gyro-bed of a helicopter or a specified place. And be sure that the G190 should be mounted so that the direction of the G190 case is parallel to the main rotor shaft of the helicopter (perpendicular to the tailpipe).

* Only required here is a temporary attachment as the final bonding on the correct direction will be made after confirmation of the direction.

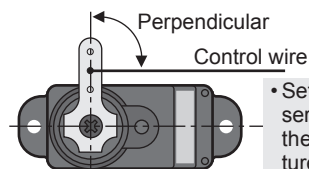


- Always use the attached double-sided sponge tape.
- Cut it a little larger than the attachment surface of the G190.
- Make sure that the surface of the fuselage on which you mount the gyro is wider than the corresponding surface of the gyro.

2 Connect the G190 rudder servo connector to the rudder servo and the G190 rudder input connector to the receiver rudder channel connector.

3 Install the rudder servo and tail control wire linkage and servo horn in accordance with the helicopter instruction manual.

* For the gyro to display top performance, it must be linked at a position at which the servo horn and control wire are perpendicular at the rudder neutral position.



- Set the length of the servo horn based on the model manufacturer's instructions.

Initial adjustment

4 Temporarily set the trimmer of the gyro's sensitivity approximately at 75%.



- First, turn the trimmer fully clockwise. At this time, the position at which the trimmer cuts in is the 100% position. Set the cut-in position to the 75% position.

* Carry out the further tuning later while flying your helicopter.

When turning on the power

5 Pull throttle stick to idle position. Turn on the transmitter power and then the gyro (receiver) power in the proper sequence.

Initialization of G190

- When G190 is turned on, it will automatically start initialization procedure of its gyro sensor by reading the reference point. So, do not move the aircraft until the LED monitor starts to light continuously after quick blinking.
- Please note that initialization won't be carried out properly and the LED monitor won't stop blinking if G190 is used under considerable vibration.

Rudder servo direction

6 Try moving the rudder stick to the left and right, and check the direction of operation of the rudder servo. If the rudder servo moves in the opposite direction, use the transmitter reverse function to reverse it.

Gyro operation direction

7 If the rudder servo moves to the left when the nose of the helicopter turned to the right, the gyro direction is correct. If the servo moves in the opposite direction, reverse the gyro upside down.

* If you try to fly the helicopter while the gyro operation direction is wrong, the nose will swing to the right or left.

8 Firmly fix the gyro after the gyro operation direction is determined.

Flying Adjustment

9 Lift off and hover, then adjust the rudder neutral position with the transmitter trim lever.

* For large deviation, use the fuselage linkage to adjust the rudder neutral position.

10 Adjust the gyro sensitivity to just before the helicopter tail starts to hunt.

* When hunting occurs, set to a lower value.

* Adjust the sensitivity gradually while checking for hunting.

<Servo Horn>: The gyro sensitivity also changes with the length of the servo horn. If the sensitivity is too low, lengthen the servo horn. Conversely, when hunting does not stop, shorten the servo horn.

<Mixing>: Where necessary, use the transmitter's revolution mixing (pitch to rudder mixing).

Caution: Please note that the aircraft may become unstable in its behavior and blunt in responding to the gyro signal when the driving battery is low.

Precautions

CAUTION Mounting Precautions

❗ Always use the attached sensor tape to mount the G190.

* The purposes are not only to fix the gyro firmly to the fuselage but also to prevent unnecessary vibrations of the fuselage from traveling directly to the gyro.

❗ When mounting the G190, leave a small margin so that the gyro connection cable is not stretched tight.

* If the cable is stretched tight, the gyro will not display top performance. If the gyro is dislodged, the gyro may malfunction and is very dangerous.

❗ Mount the G190 and receiver as far away as possible from the drive motor and ESC.

* The drive motor and ESC generate strong electromagnetic noise. This noise may interfere with the gyro/receiver and cause erroneous operation.

❗ Insert the connectors fully and firmly.

* If vibration, etc. causes a connector to work loose during flight, the heli may crash.

❗ Always check the direction of operation of the servos.

* If you attempt to fly the model when a servo operates in the wrong direction, the fuselage will spin in a fixed direction.

Operating Precautions

⊘ When turning on the power, do not move the fuselage until the LED monitor starts to light continuously after quick blinking.

* It will automatically start initialization procedure of the gyro sensor.

⊘ Avoid sudden temperature changes.

* Sudden temperature changes will cause the G190's reference point to change. For example, in the winter, do not fly immediately after removing the model from inside a heated car and in the summer, do not fly immediately after removing the model from inside an air conditioned car. Allow the model to stand for about 10 minutes and turn on the power after the temperature inside the gyro has stabilized. Also, if the gyro is exposed to direct sunlight, the temperature may change suddenly. Take suitable measures so that the gyro is not exposed to direct sunlight.

Fuselage Maintenance Precautions

❗ Always perform proper maintenance for ultimate performance.

* Make the fuselage vibration as small as possible. Fuselage vibration has an adverse affect on gyro operation.

⊘ Do not drop or apply any strong shocks to G190.

* G190 contains precision parts in its inside such as a gyro sensor. A strong shock may lead to the failure of the G190.

Repair Service

Before requesting repair, read this instruction manual again and recheck your system. Should the problem continue, request repair service as follows:

Describe the problem in as much detail as possible and send it with a detailed packing list together with the parts that require service.

- Symptom (Including when the problem occurred)
- System (Transmitter, Receiver, Servo's and model numbers)
- Model (Model name)
- Model Numbers and Quantity
- Your Name, Address, and Telephone Number.

If you have any questions regarding this product, please consult your local hobby dealer or contact the Futaba Service Center.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J.A. Ascencio, V. Rodríguez-Lugo, C. Angeles, T. Santamaría, V.M. Castaño. Computational Materials Science 25 (2002) 413426

- [2] Consuelo Arteaga de Murphy, Martha Pedraza-López, Guillermina Ferro-Flores, Eduardo Murphy-Stack, Leonora Chávez-Mercado, Jorge A. Ascencio, Laura García-Salinas, Salomón Hernández-Gutiérrez. Nuclear Medicine and Biology 28 (2001) 319326

- [3] T. López, M. Asomoza, M. Picquart, P. Castillo-Ocampo, J. Manjarrez, A. Vázquez, J.A. Ascencio. b Optical Materials 27 (2005) 12701275

- [4] G.Binning, C.F. Quate and Gerber Phys. Rev. Letters. 56, 930 (1986)

- [5] .E.Tekman and S.Ciraci Phys. Rev. B 40, 10286 (1989)

- [6] S.Ciraci, E.Tekman and I.P.Batra, Phys.Rev. B 46, 10411, (1992)

- [7] S.Ciraci and I.P.Batra Phys.Rev. B 36, 6194 (1987)

- [8] E.Tekman, S.Ciraci. Phys.Rev. B 42, 1860, (1990)

- [9] F.F. Abraham, I.P.Batra and S.Ciraci. Phys. Rev. Letters. 60, 1314, (1988)

- [10] A. Buldum, S. Cicari and Inder Patra. Phys.Rev. B. 60, 2648 (1998)

- [11] X. Jiang, T. Herricks, and Y. Xia, Adv. Mater. 2003, 15, No 14, July 17
- [12] Proakis, Manolakis; Digital Signal Processing, 3º Edition; Prentice Hall; 1996, United State of America.
- [13] Astrom, Wittenmark; Sistemas Controlados por Computadora, 1º Edición; Paraninfo; 1988, Madrid, España.
- [14] Freeman, Skapura; Redes Neuronales; 1º Edición; Addison-Wesley; 1993, Madrid, España.
- [15] Omidvar, Elliott; Neural Systems for Control; Academia Press; 1997, California, United State of America.
- [16] Khalil, Nonlinear Systems; Prentice Hall; 2002, Michigan State University, United State of America.
- [17] Ibrahim, Introduction to Applied Fuzzy Electronics; Prentice Hall; 1997, New Jersey, United State of America.

ARTÍCULO.

APROXIMACIÓN DIFUSA DE MOVIMIENTO DE PROTESIS DE PIERNA POR CONTROL DE MICRO GIROSCOPIO.

E. Soto G.¹, R. Salazar²

1) Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, 21 sur 1103, Col. Santiago, Puebla, Pue., México. 2) Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, 21 sur 1103, Col. Santiago, Puebla, Pue., México.

ANEXOS.