



**UNIVERSIDAD
AUTONOMA DE
BUCARAMANGA**

DIVISION DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERIA

INGENIERIA MECATRONICA

DISEÑO Y CONTROL

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA PARA REHABILITACION DE
EXTREMIDADES SUPERIORES CON CONTROL DE VELOCIDAD.**

AUTOR

JOSE ENRIQUE APARICIO RUIDIAZ

DIRECTOR DE PROYECTO

CARLOS FORERO

ASESOR

HERNANDO GONZALES

BUCARAMANGA, NOVIEMBRE DE 2014

Tabla de Figuras.....	5
Tabla de Cuadros	7
RESUMEN	8
OBJETIVOS.....	9
OBJETIVOS GENERAL.....	9
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACION	10
ANTECEDENTES.....	12
MARCO TEORICO	18
Mecanoterapia.....	18
Biomecánica.....	18
Modelo Humano.....	22
Parámetros Inerciales	24
Rueda.....	26
Maquina Simple	26
Mecánicos	27
Elementos de unión.....	27
Elementos de unión fija.....	27
Elementos de unión desmontable:	27
Elementos de transmisión	28
Elementos de pivotar y rodadura	28
Eléctricos.....	28
Generadores de movimiento	29
De control y maniobra	29
Electrónicos	29
PLC	30

Arduino.....	32
Mecanismo	35
Sistema de Control	35
Clasificación de los sistemas de control según su comportamiento.....	36
Sistema de control de lazo abierto	36
Sistema de control de lazo cerrado	37
Tipos de sistemas de control.....	38
Hechos por el hombre	38
Naturales.	41
Hechos por el hombre y naturales.....	41
De cualquier tipo.....	41
Control Predictivo.	42
Características	42
La ingeniería en los sistemas de control.	43
El diseño por análisis.....	43
Actuadores y Sensores	44
Actuadores	44
Actuadores Eléctricos.....	45
Moto-reductores	46
Concepto de relación de reducción en un Motor reductor.....	47
Concepto de par o torque en un Motor reductor	48
<i>DISEÑO METODOLOGICO</i>.....	50
Análisis bibliográfico y estudio documental.....	50
Selección de sensores y actuadores	51
Bocetos y Diseño en CAD.....	51
Estudio del control y mecanismos.....	51
Diseño, Simulación e Implementación.....	51
Especificaciones.....	51

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	52
DESARROLLO DEL PROYECTO	53
Diseño Mecánico	53
Selección de Actuadores	54
Diseño Electrónico	60
Diseño de Controlador	62
Programación de la Tarjeta de Control Arduino ADK.....	68
PRESUPUESTO	69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFIA	72
Anexos	75
Anexo 1 – Hoja de Datos Motor	76
Anexo 2 - Planos.....	77
Anexo 3 – Fotos Prototipo	80
Anexo 4 – Código Arduino.....	84
Anexo 5 - Pantalla Interfaz en celular Android.....	87

Tabla de Figuras

Figura 1- Maquinas Dr. Zander	13
Figura 2 - Maquinas Dr. Zander	15
Figura 3- Maquinas Rehabilitación Hombro	16
Figura 4 - Maquinas Rehabilitación Brazos	17
Figura 5 - Biomecanica Brazo	19
Figura 6 - Biomecanica brazo.....	20
Figura 7- Biomecánica Cuerpo.....	23
Figura 8- Engranajes constituyentes de la caja de cambios de un motor.	27
Figura 9 - Contactor de CA para la aplicación de bombeo.....	28
Figura 10 - Circuito impreso de un reproductor de DVD Philips	29
Figura 11 - Electrónicos PLC.....	31
Figura 12 - Electrónicos Arduino	34
Figura 13 - Moto-reductor.....	47
Figura 14 - Torque.....	48
Figura 15 - Diseño Metodológico.....	50
Figura 16 - Cronograma Actividades.....	52
Figura 17 - Prototipo Inicial Vista Isométrica	53
Figura 18 - Prototipo Inicial Vista Frontal	53
Figura 19 - Prototipo Final Vista Isométrica	54
Figura 20 - Prototipo Final Vista Frontal.....	54
Figura 21 - Diagrama de Cuerpo Libre.....	55
Figura 22 - MR105-44	59
Figura 23 - Enconder Incremental.....	60
Figura 24 - Tarjeta de Potencia Pololu VNH3SP30.....	60
Figura 25 - Tarjeta Arduino ADK	61
Figura 26 - Módulo de Comunicación Bluetooth.....	62
Figura 27 - Respuesta Transitoria Experimental Lazo Abierto	62
Figura 28 - Best Fit.....	63

Figura 29 - Respuesta Transitoria	64
Figura 30 - Respuesta al sistema Lazo Cerrado	65
Figura 31 - Comparación de Respuestas Transitorias	66
Figura 32 - Respuesta Transitoria ante otro set point	67

Tabla de Cuadros

Tabla 1 – Parámetros Inerciales.....	24
Tabla 2 – Parámetros Inerciales 2.....	25
Tabla 3 – Motores.....	58
Tabla 4 – Presupuesto.....	69

RESUMEN

En el presente documento observa el desarrollo del prototipo de una máquina para realizar ejercicios de rehabilitación en miembros superiores del cuerpo humano, la cual cuenta con un control de velocidad en lazo cerrado y con una interfaz gráfica en celular con plataforma Android.

El proyecto inició con un estudio de las necesidades de equipos para personas con problema físicos y de la iniciativa de mejorar un dispositivo mecánico que realiza un apoyo a las fisioterapias. Se hizo una disertación de las maneras más sencillas en que se pueden realizar este tipo de prototipos teniendo en cuenta los diferentes mecanismos de transmisión del movimiento.

Después de evaluar y clasificar los criterios que se necesitan para este, se escogen varias opciones poniendo en tela de juicio la que mejor se acople a nuestros criterios de diseño. A continuación se trabajó en un modelo mecánico teniendo en cuenta algunos conceptos de resistencia materiales, funcionalidad del prototipo, transmisión del movimiento, buscando simplicidad en el proceso de fabricación de acuerdo al prototipo.

Con el prototipo construido se diseñó el control de velocidad en lazo cerrado, dando paso a una interfaz gráfica en la plataforma Android en la cual se asignara el valor deseado al sistema y por último se realizaron algunas pruebas básicas de funcionalidad del sistema integrado.

OBJETIVOS

OBJETIVOS GENERAL

- Diseñar un prototipo de máquina para rehabilitación de extremidades superiores con control de velocidad.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar en SolidWorks un prototipo funcional de una máquina de rehabilitación de extremidades superiores.
- Presentar en planos cada uno de los componentes del prototipo.
- Desarrollar un control de velocidad para el prototipo.
- Construir el prototipo y realizar pruebas de funcionamiento al control de velocidad.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACION

Desde tiempo inmemorial el hombre se ha preocupado de recuperar y rehabilitar a los individuos que habían perdido sus condiciones físicas naturales, como consecuencia de afecciones patológicas o por los accidentes acaecidos en sus vidas. Los remedios empleados con fines terapéuticos surgieron ya con los hombres primitivos como un medio más de defensa y supervivencia de la especie. Es razonable aceptar el hecho de que el hombre primitivo ya tuviera padecimientos y que necesitara de sus semejantes para intentar aliviar o solucionar sus dolencias. La historia de la humanidad se funde con la historia de los intentos por remediar la enfermedad y evitar la muerte. Los primeros momentos del ser humano se desarrollaron en un mundo hostil en el que la supervivencia de los homínidos era corta y difícil, a juzgar por los restos y reconstrucciones disponibles.

En la Prehistoria, el hombre debió utilizar los medios que le proporcionaba la naturaleza para curarse. Éstos se corresponden con la utilización de los agentes físicos como elementos empíricos.

Hoy en día y gracias a que la tecnología ha estado involucrada en casi todo con respecto a mejorar y facilitar las cosas, se piensa que para una mejor rehabilitación fisioterapéutica la utilización de una máquina de rehabilitación de extremidades superiores con un control de velocidad para que en cada etapa de la recuperación el nivel de dificultad varíe.

La máquina de rehabilitación de extremidades superiores se puede definir como una maquina compuesta por elementos mecánicos y electrónicos dando un movimiento ya sea circular o elíptico que facilitan al usuario una utilización

amigable y un tanto menos dolorosa al momento de la rehabilitación por sus niveles variables de fuerza.

La intención de la máquina de rehabilitación de extremidades superiores es que el usuario pueda hacer sus rehabilitaciones con un mínimo de acompañamiento y lograr un tiempo de recuperación un poco más rápida, así para el centro de rehabilitación pueda lograr que sus médicos en fisioterapia tener más pacientes a cargo por sesión.

ANTECEDENTES [1]

Jonas Gustav Vilhelm Zander (29 de marzo de 1835 en Estocolmo – 17 de junio de 1920) fue un médico sueco, ortopedista y uno de los creadores de mecanoterapia. Es conocido por inventar un método terapéutico de ejercicio llevado a cabo por medio de un aparato especial. Con el cual podrían ser entrenados grupos específicos de músculos en dosis exactas. Después de que sus máquinas habían ganado premios en diversas exposiciones de mundo.

Estableció en 1860 el Instituto Zander en Londres, donde publicó *Mechanical Exercise: A Means of Cure* (1883), para viajar posteriormente a Nueva York.

Allí alimentó su esperanza de ofrecer un complemento a los gimnasios del momento, con sus aparatos de resistencia muscular gradual, orientándolo así a las mujeres (en ese momento excluidas de los gimnasios), personas ancianas y gente débil o incapaz de mover grandes pesas.

Han pasado más de 100 años, y aún en los gimnasios actuales de fisioterapia se encuentran aparatos muy parecidos a los propuestos por el Dr. Zander. El pilates, sin ir más lejos, utiliza máquinas inspiradas por las que en su momento desarrolló Zander.

A continuación, algunas máquinas desarrolladas por el Dr. Zander.

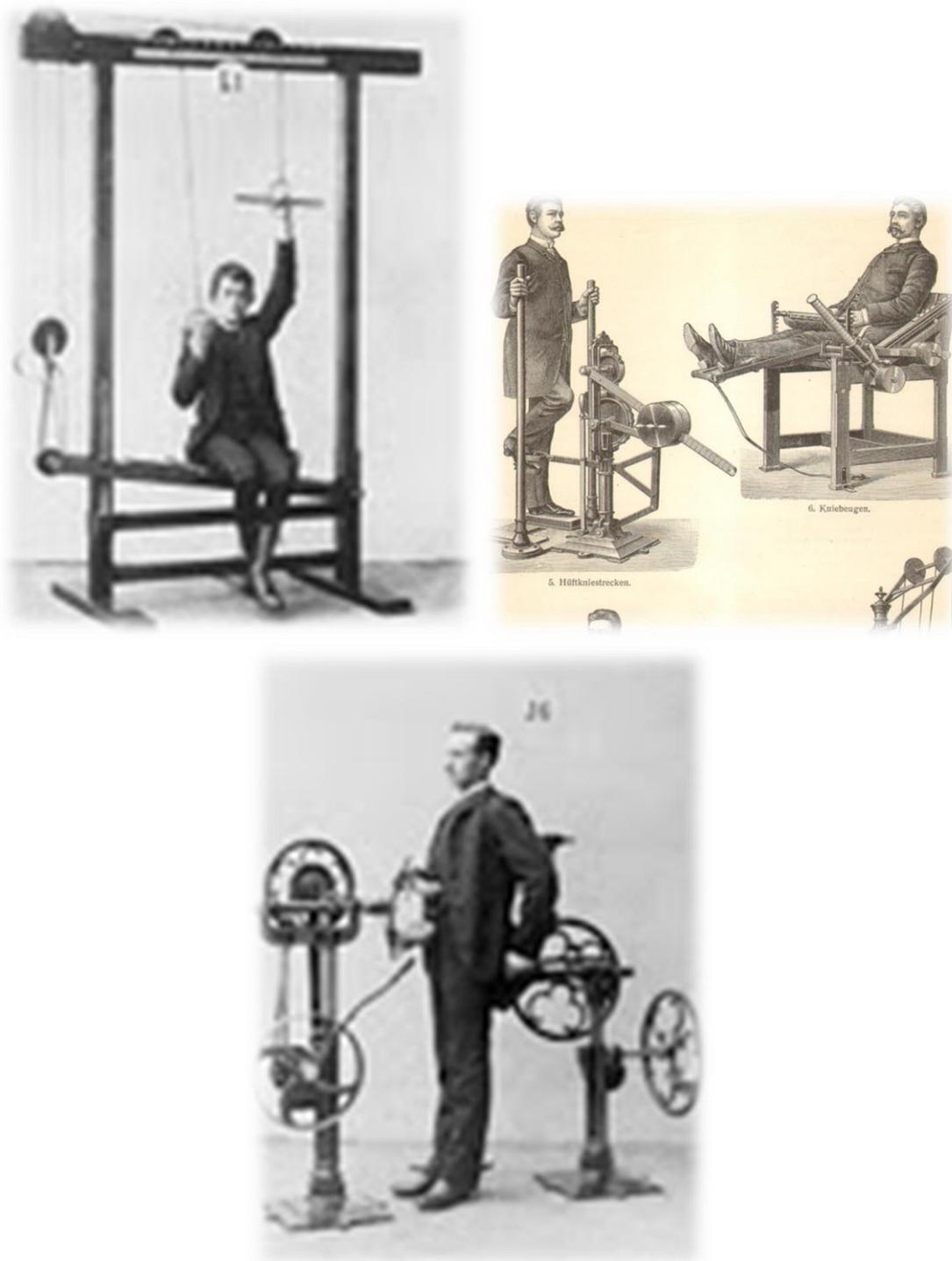


Figura 1- Maquinas Dr. Zander [1]



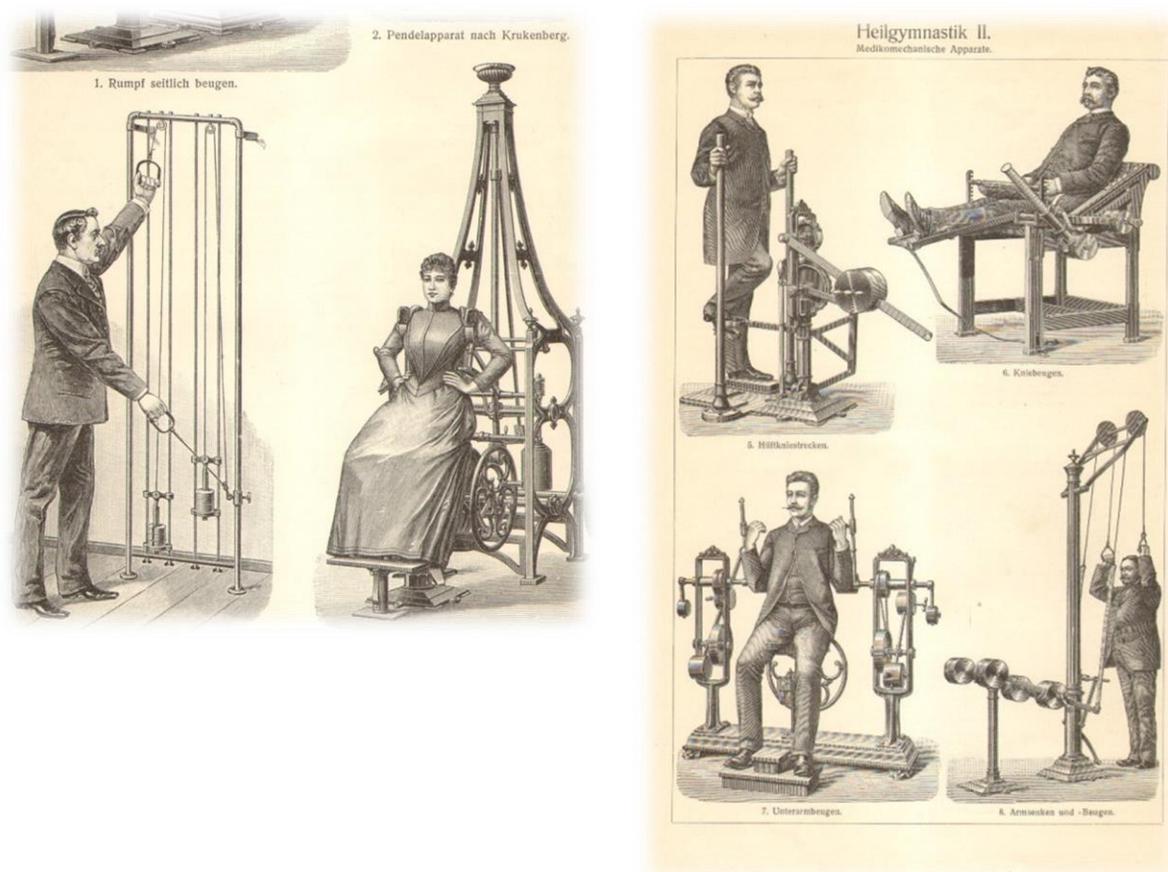


Figura 2 - Maquinas Dr. Zander [1]

En la actualidad las maquinas que están a la venta en mercado son estas.



Figura 3- Maquinas Rehabilitación Hombro [2] [3] [4]



Figura 4 - Maquinas Rehabilitación Brazos [2] [3] [4]

MARCO TEORICO

Mecanoterapia. [5] [6] [7]

La mecanoterapia es una disciplina que se engloba dentro de la fisioterapia y se define como el arte y la ciencia del tratamiento de distintas enfermedades y lesiones, mediante ingenios mecánicos.

Aplicada desde la antigüedad, y desarrollada en tiempos modernos por Gustav Zander, la mecanoterapia utiliza una gran variedad de aparatos e ingenios, como mesas de manos, ruedas, jaulas con sistema de pesos y poleas, tracciones, tabla de pedales, etc.

Se utiliza fundamentalmente en la rehabilitación física de enfermos y lesionados.

La mecanoterapia es una prescripción médica y debe ser exclusivamente pautada por un fisioterapeuta para garantizar la eficacia del tratamiento.

Biomecánica [8] [9] [10]

Las lesiones músculo-esqueléticas debidas a la carga física suelen tener un origen común: la sobrecarga de estructuras corporales (articulaciones, tendones y vainas tendinosas, ligamentos, músculos, etc.) debido a niveles repetidos y/o excesivos de esfuerzos en posturas inadecuadas. Aunque muchos métodos de evaluación ergonómica abordan la cuestión de valorar el nivel de riesgo de la realización de esfuerzos, es la aplicación de procedimientos propios de la biomecánica los que permitirán una evaluación más detallada y específica del riesgo.

Evaluar si un esfuerzo en una determinada postura puede provocar sobrecarga en alguna estructura del aparato locomotor es una tarea compleja. La biomecánica aborda dicha tarea estableciendo una analogía entre el cuerpo humano y una máquina compuesta de palancas y poleas. Así, puede considerarse que una

articulación es el punto de apoyo de una palanca (un hueso largo) accionada por un músculo (la potencia), para vencer una resistencia (el peso propio de los miembros y la carga sostenida) (Figura 5). Al establecer esta analogía es posible aplicar las leyes físicas para determinar si existen sobrecargas articulares durante la ejecución de un esfuerzo.

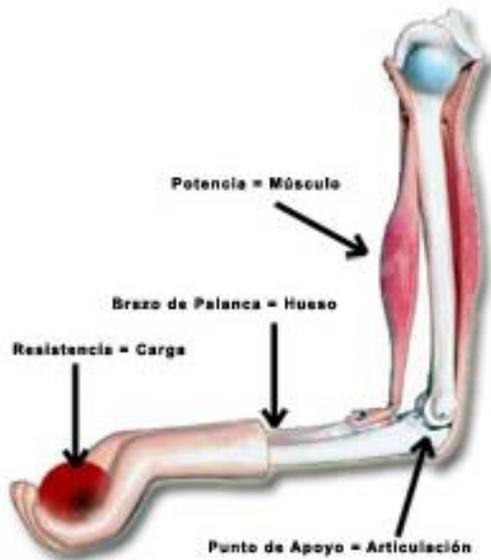


Figura 5 - Biomecánica Brazo

El esfuerzo al que se somete a la articulación es, por una parte, el debido al mantenimiento del peso de los miembros del cuerpo y de la carga, y por otra, el momento que dichas fuerzas provocan sobre la articulación y que debe ser vencido para mantener la postura. Conociendo que el momento de una fuerza respecto a un punto es el producto vectorial del vector fuerza por el vector distancia desde el punto al punto de aplicación de la fuerza y aplicando las ecuaciones de equilibrio, es posible determinar el momento y la fuerza de reacción en la articulación.

En la Figura 6 se pone como ejemplo la articulación del codo. Las cargas soportadas por el codo son: el peso de carga sostenida por la mano (C) y el peso

propio del antebrazo y la mano (P_p) aplicado en el centro de gravedad del miembro. Suponiendo que la posición se mantiene estática, en el codo deben aparecer una reacción que contrarreste dichas cargas (R_c) y un momento (M_c) igual en módulo y signo contrario al provocado por P_p y C . Aplicando las leyes de equilibrio puede conocerse el valor de M_c y R_c :

$$R_c = C + P_p$$

$$M_c = C \times OP \times \cos(\alpha) + P_p \times OC_{dg} \times \cos(\alpha)$$

Una vez conocidos M_c y R_c será necesario conocer si los valores que adoptan pueden resultar perjudiciales para la articulación.

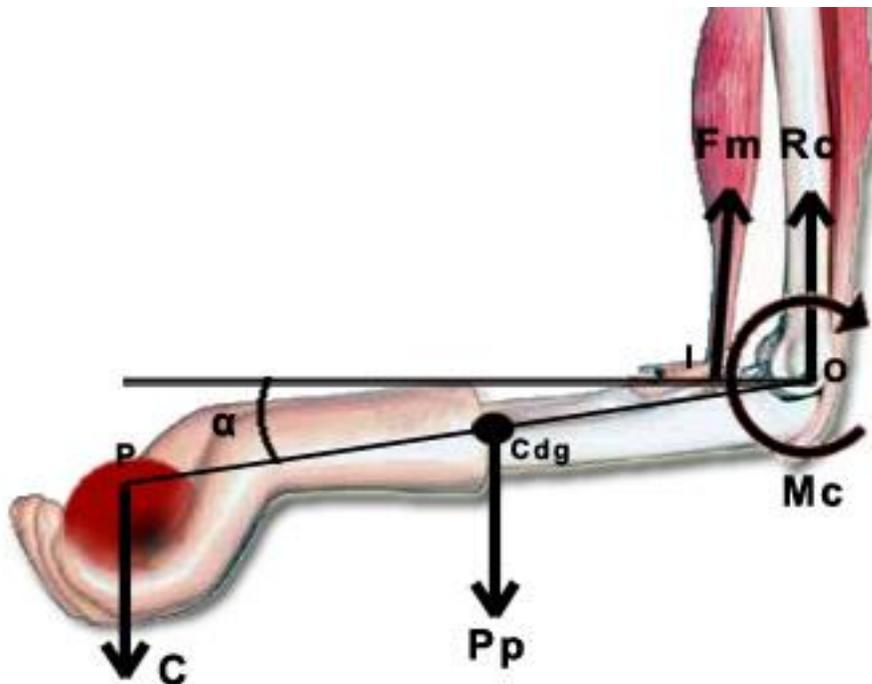


Figura 6 - Biomecánica brazo

Este procedimiento puede repetirse para cada una de las articulaciones, determinado, de esta forma, si el esfuerzo realizado puede resultar perjudicial para

alguna de ellas. Para ello es necesario conocer cuál es el valor máximo recomendable de M_c para cada articulación.

En el ejemplo de la Figura 9, el momento M_c contrarresta el momento creado en el codo por la carga (C) y el peso de la mano y el antebrazo (P_p). El momento M_c en el codo es generado por los músculos flexores que se encuentran en el segmento brazo: bíceps, músculo braquial y braquiorradial. La contracción de este paquete muscular genera una fuerza (F_m) a través del tendón que lo une al hueso Radio, y es dicha fuerza la que genera el momento M_c . Así pues puede plantearse que:

$$M_c = F_m \times IO \times \cos(\alpha)$$

Siendo I el punto de inserción del tendón en el hueso, y estimándose habitualmente la distancia entre I y O como 5 cm cuando el brazo y el antebrazo forman 90° . El valor máximo de M_c será aquél correspondiente a la máxima capacidad de contracción del paquete muscular. La fuerza máxima de una contracción en un músculo, trabajando con la longitud normal, es de unos $8,5 \text{ kg/cm}^2$ (aproximadamente). Un bíceps tiene una superficie de corte transversal de unos 16 cm^2 , por lo que la fuerza máxima de contracción será de aproximadamente 136 kg. Cuando el ángulo formado entre brazo y antebrazo es de 90° , la inserción del bíceps está a unos 5 cm por delante del eje de rotación de la articulación, por lo que M_c podrá adoptar un valor máximo teórico de $66,7 \text{ N}\cdot\text{m}$. Si se estima la longitud total de la palanca en unos 35 cm. se obtiene que la carga máxima que deberá levantarse sea 19,5 kg.

Sin embargo, el procedimiento planteado es, en la realidad, bastante más complejo. El análisis se complica en la medida en que tengamos que considerar articulaciones más alejadas de la mano, ya que ésta se toma como el origen de la secuencia de cálculo, en especial cuando se quiere analizar la articulación lumbar (L5/S1). Para ser operativo deben resolverse ciertos problemas y asumirse ciertas simplificaciones. Por ejemplo, no todos los músculos tienen la misma función ni su disposición espacial es idéntica. Además, los esfuerzos están condicionados no

sólo a las cargas, sino también a la disposición muscular. Por otro lado, cuando varía el grado de estiramiento de un músculo varía su capacidad de producir fuerza, y durante el movimiento suele existir una modificación del ángulo que forma el brazo de palanca respecto a la acción de su propia fuerza. A esto hay que añadir el hecho de que, incluso para personas con la misma constitución física, la capacidad muscular puede variar considerablemente. Por último, otro problema añadido es la necesidad de conocer la longitud, el peso y la posición del centro de gravedad de cada uno de los segmentos corporales.

Simplificaciones asumidas y modelos.

Es factible desarrollar aplicaciones similares a la expuesta para la valoración de los esfuerzos en cada articulación. El procedimiento es el mismo, siguiendo etapa tras etapa, en función de la articulación que se desea analizar. Esto obliga a tener que disponer de modelos matemáticos que simplifiquen los cálculos antes expuestos.

Modelo Humano.

En primer lugar debe adoptarse un modelo humano en el que se determine el número de segmentos que lo componen, la localización del centro de gravedad y el peso de cada segmento. A este conjunto de datos se le denomina parámetros inerciales del modelo humano. La segmentación del cuerpo puede realizarse de múltiples formas dependiendo de cuál sea el objeto de estudio, aunque habitualmente se utilizan 14 segmentos que se presuponen no deformables (Cabeza + cuello, Tronco, Muslos, Piernas, Pies, Brazos, Antebrazos y Manos). Para la determinación de un segmento corporal son imprescindibles dos puntos que definan su eje longitudinal, que habitualmente se corresponden con los extremos de dicho eje: el punto proximal (inicio del segmento) y punto distal (final del segmento).

Existen modificaciones o adaptaciones sobre este modelo básico. Los más comunes son: dividir el tronco en dos, tres o más segmentos (tórax, abdomen y pelvis), siendo éste el modelo desarrollado inicialmente por Dempster (1955) y Plagenhoef (1962, 1971), o simplificar el modelo reduciendo el número de segmentos, lo que implica asumir que determinadas articulaciones se comportan de forma rígida, perdiéndose la movilidad entre ellas.



Figura 7- Biomecánica Cuerpo

El modelo empleado en el presente caso (Figura 7) presenta 16 segmentos, habiéndose dividido el tronco en tórax y pelvis, y ésta a su vez en dos segmentos que comienzan en el espacio intervertebral L5/S1 y finalizan en las caderas.

Parámetros Inerciales.

El estudio del peso y la posición del centro de gravedad de cada uno de los segmentos corporales se han abordado mediante técnicas experimentales, ya que dependen de la cantidad de materia que tienen los segmentos y de su distribución espacial, algo que es individual y particular de cada persona.

Aunque algunos autores han tratado de obtener parámetros inerciales individualizados para cada persona (Whitsett, 1963; Hanavan, 1964; Jensen, 1978; Hatze, 1980 y Yeadon 1990), los procedimientos para obtenerlos resultan poco precisos y costosos. Por ello, lo más habitual es expresar el peso de cada segmento como un porcentaje del peso total del individuo. Existen diversos modelos de este estilo. El más habitualmente empleado es el procedente de los estudios de Dempster (1955) y Clauser (1969), que obtuvieron los datos del desmembramiento de cadáveres (Tabla 1).

SEGMENTO	MASA	CG	Punto proximal	Punto distal
Cabeza y cuello	7.3%	46.40%	vertex	gonion medio
Tronco	50.7%	38.03%	hueco supraesternal	cadera media
Brazo	2.6%	51.30%	acromion	radiale
Antebrazo	1.6%	38.96%	radiale	art. muñeca
Mano	0.7%	82.00%	art. muñeca	estiloides 3ºdedo
Muslo	10.3%	37.19%	art.cadera	tibiale
Pantorrilla	4.3%	37.05%	tibiale	art.tobillo
Pie	1.5%	44.90%	talón	dedo 1º

Tabla 1 - Parámetros Inerciales

En la Tabla 1 la columna MASA indica la masa del segmento en porcentaje respecto a la masa total del sujeto. La columna CG indica el porcentaje, respecto a la longitud total del segmento correspondiente, al que se encuentra el centro de gravedad del segmento medido desde el punto proximal.

Otros estudios, como los de Drillis y Contini (1966) permiten realizar una estimación de la longitud de los diferentes segmentos corporales en función de la estatura del individuo (Tabla 2). Puede emplearse cuando se desconocen dichos valores y su medición directa es imposible. Los datos de la longitud de los segmentos fueron obtenidos mediante mediciones sobre sujetos vivos, llevando a cabo una regresión estadística respecto a la variable estatura. De esta forma se obtuvieron las dimensiones de cada segmento como una proporción de la estatura del individuo. En general se encontraron correlaciones con $r^2 > 0.5$, excepto en el caso de la longitud del pie y de la longitud de la mano en los que $r^2 < 0.5$. Debe recordarse que los valores obtenidos son estimados, y que en cualquier caso es preferible la medición directa de las longitudes. No obstante, el empleo de las correlaciones entre la estatura y las longitudes de los segmentos corporales provoca un error estándar inferior a un centímetro. Es decir, en el 95% de las ocasiones, la longitud real y la estimada diferirán en menos de 2 centímetros.

SEGMENTO	% estatura
Mano	10.8%
Torax	28.8%
Brazo	18.6%
Antebrazo	14.6%
Pelvis	4.5%
Muslo	20.0%
Pantorrilla y pie	28.5%

Tabla 2 - Parámetros Inerciales 2

Así, puede estimarse que un individuo cuyo peso fuera 75 kilogramos y cuya estatura fuese 175 cm., tendría un antebrazo cuyo peso sería 1,2 kilos ($75 \cdot 0.016$), con una longitud de 25,55 cm. ($175 \cdot 0.146$) y cuyo centro de gravedad se encontraría a 9.95 cm. del rádiale.

Rueda [11]

La rueda es una pieza mecánica circular que gira alrededor de un eje. Puede ser considerada una máquina simple, y forma parte del conjunto denominado elementos de máquinas.

Es uno de los inventos fundamentales en la Historia de la humanidad, por su gran utilidad en la elaboración de alfarería, y también en el transporte terrestre, y como componente fundamental de diversas máquinas. El conocimiento de su origen se pierde en el tiempo, y sus múltiples usos han sido esenciales en el desarrollo del progreso humano.

Maquina Simple [12] [13] [14]

Una máquina simple es un artefacto mecánico que transforma un movimiento en otro diferente, valiéndose de la fuerza recibida para entregar otra de magnitud, dirección o longitud de desplazamiento distintos a la de la acción aplicada.

En una máquina simple se cumple la ley de la conservación de la energía: (*la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma*). La fuerza aplicada, multiplicada por la distancia aplicada (trabajo aplicado), será igual a la fuerza resultante multiplicada por la distancia resultante (trabajo resultante). Una máquina simple, ni crea ni destruye trabajo mecánico, sólo transforma algunas de sus características.

Máquinas simples son: la palanca, las poleas, el plano inclinado, la cuña, etc.

No se debe confundir una máquina simple con elementos de máquinas, mecanismos o sistema de control o regulación de otra fuente de energía.

Las máquinas simples se confeccionaron desde tiempos muy remotos, exactamente cuando los homo sapiens empezaron a inventar herramientas, como las hachas.

Mecánicos

Mecánicos: son las piezas de metal o de otros materiales que constituyen los elementos de la máquina. Podemos diferenciar:



Figura 8- Engranajes constituyentes de la caja de cambios de un motor.

Elementos de unión

Son los que unen los distintos elementos de la máquina:

Elementos de unión fija: dan lugar a una unión que una vez realizada no puede ser deshecha:

1. Remache
2. Soldadura

Elementos de unión desmontable: (dan lugar a uniones que pueden ser desmontadas en un momento dado):

1. Tornillo
2. Pasador
3. Grapa
4. Presilla

Elementos de transmisión

Son los que transmiten el movimiento y lo regulan o modifican según el caso:

1. Árboles de transmisión
2. Engranaje
3. Husillo
4. Cadenas y correas de transmisión
5. Balancín

Elementos de pivotar y rodadura

Son los elementos que permiten el giro, deslizamiento o pivotaje de los elementos móviles, sin demasiado desgaste ni producción de calor:

1. Cojinete
2. Rodamiento
3. Resbaladera

Eléctricos



Figura 9 - Contactor de CA para la aplicación de bombeo

Son los elementos que se basan en la tecnología eléctrica, y que podríamos dividir:

Generadores de movimiento

Son los que alimentándose por una corriente eléctrica dan lugar a un movimiento mecánico:

1. Motores: que dan lugar a un movimiento giratorio
2. Solenoides: que dan lugar a un movimiento lineal, de longitud limitada

De control y maniobra

Permiten la regulación de otros elementos eléctricos:

1. Pulsador
2. Interruptor
3. Conmutador
4. Relé
5. Contactor

Electrónicos

Artículo principal: Componente electrónico



Figura 10 - Circuito impreso de un reproductor de DVD Philips

Dependiendo de la potencia de la máquina, los controles desde la perspectiva de la electrónica pueden ser PLC, DCL, Y PICs, todos estos son sistemas

programables en los que con una configuración llamada SCADDA, es posible observar y controlar el rendimiento de dicha máquina a través de una PC equipada con los periféricos de entrada adecuados y a un bajo costo tenemos la placa de Arduino.

PLC

Un controlador lógico programable, más conocido por sus siglas en inglés *PLC* (*programmable logic controller*), es una computadora utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial, para automatizar procesos electromecánicos, tales como el control de la maquinaria de la fábrica en líneas de montaje o atracciones mecánicas.

Los PLC son utilizados en muchas industrias y máquinas. A diferencia de las computadoras de propósito general, el PLC está diseñado para múltiples señales de entrada y de salida, rangos de temperatura ampliados, inmunidad al ruido eléctrico y resistencia a la vibración y al impacto. Los programas para el control de funcionamiento de la máquina se suelen almacenar en baterías copia de seguridad o en memorias no volátiles. Un PLC es un ejemplo de un sistema de tiempo real «duro», donde los resultados de salida deben ser producidos en respuesta a las condiciones de entrada dentro de un tiempo limitado, de lo contrario no producirá el resultado deseado.

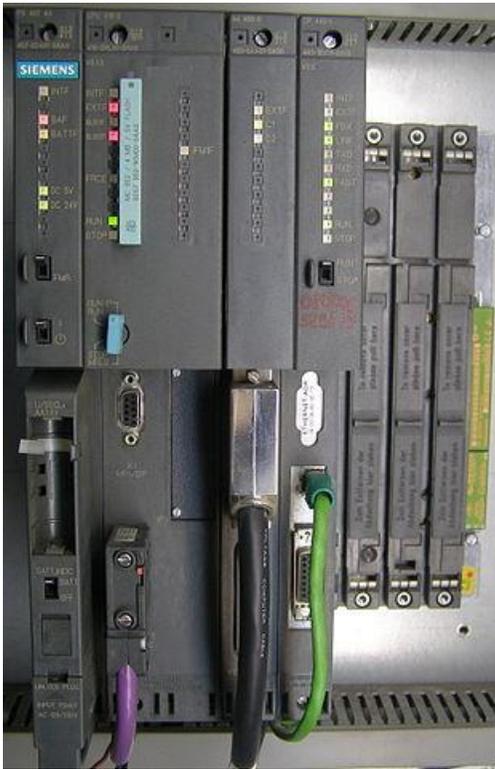


Figura 11 - Electrónicos PLC

La función básica y primordial del PLC ha evolucionado con los años para incluir el control del relé secuencial, control de movimiento, control de procesos, sistemas de control distribuido y comunicación por red. Las capacidades de manipulación, almacenamiento, potencia de procesamiento y de comunicación de algunos PLCs modernos son aproximadamente equivalentes a las computadoras de escritorio. Un enlace-PLC programado combinado con hardware de E/S remoto, permite utilizar un ordenador de sobremesa de uso general para suplantar algunos PLC en algunas aplicaciones. En cuanto a la viabilidad de estos controladores de ordenadores de sobremesa basados en lógica, es importante tener en cuenta que no se han aceptado generalmente en la industria pesada debido a que los ordenadores de sobremesa ejecutan sistemas operativos menos estables que los PLCs, y porque el hardware del ordenador de escritorio está típicamente no diseñado a los mismos niveles de tolerancia a la temperatura, humedad,

vibraciones, y la longevidad como los procesadores utilizados en los PLC. Además de las limitaciones de hardware de lógica basada en escritorio; sistemas operativos tales como Windows no se prestan a la ejecución de la lógica determinista, con el resultado de que la lógica no siempre puede responder a los cambios en el estado de la lógica o de los estado de entrada con la consistencia extrema en el tiempo como se espera de los PLCs. Sin embargo, este tipo de aplicaciones de escritorio lógicos encuentran uso en situaciones menos críticas, como la automatización de laboratorio y su uso en instalaciones pequeñas en las que la aplicación es menos exigente y crítica, ya que por lo general son mucho menos costosos que los PLCs.

Dentro de las ventajas que estos equipos poseen se encuentra que, gracias a ellos, es posible ahorrar tiempo en la elaboración de proyectos, pudiendo realizar modificaciones sin costos adicionales. Por otra parte, son de tamaño reducido y mantenimiento de bajo costo, además permiten ahorrar dinero en mano de obra y la posibilidad de controlar más de una máquina con el mismo equipo. Sin embargo, y como sucede en todos los casos, los controladores lógicos programables, o PLC's, presentan ciertas desventajas como es la necesidad de contar con técnicos calificados y adiestrados específicamente para ocuparse de su buen funcionamiento.

Arduino [15]

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida. Los microcontroladores más usados son el Atmega168, Atmega328, Atmega1280, ATmega8 por su sencillez y bajo coste que permiten el

desarrollo de múltiples diseños. Por otro lado el software consiste en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación Processing/Wiring y el cargador de arranque que es ejecutado en la placa.

Desde octubre de 2012, Arduino se usa también con microcontroladoras CortexM3 de ARM de 32 bits, que coexistirán con las más limitadas, pero también económicas AVR de 8 bits. ARM y AVR no son plataformas compatibles a nivel binario, pero se pueden programar con el mismo IDE de Arduino y hacerse programas que compilen sin cambios en las dos plataformas. Eso sí, las microcontroladoras CortexM3 usan 3,3V, a diferencia de la mayoría de las placas con AVR que generalmente usan 5V. Sin embargo ya anteriormente se lanzaron placas Arduino con Atmel AVR a 3,3V como la Arduino Fio y existen compatibles de Arduino Nano y Pro como Meduino en que se puede conmutar el voltaje.

Arduino se puede utilizar para desarrollar objetos interactivos autónomos o puede ser conectado a software tal como Adobe Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data). Las placas se pueden montar a mano o adquirirse. El entorno de desarrollo integrado libre se puede descargar gratuitamente.

Arduino puede tomar información del entorno a través de sus entradas analógicas y digitales, puede controlar luces, motores y otros actuadores. El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing). Los proyectos hechos con Arduino pueden ejecutarse sin necesidad de conectar a un computador.

El proyecto Arduino recibió una mención honorífica en la categoría de Comunidades Digital en el Prix Ars Electrónica de 2006.



Figura 12 - Electrónicos Arduino [15]

El módulo Arduino ha sido usado como base en diversas aplicaciones electrónicas:

- Xoscillo: Osciloscopio de código abierto.
- Equipo científico para investigaciones.
- Arduinome: Un dispositivo controlador MIDI.
- OBDuino: un económetro que usa una interfaz de diagnóstico a bordo que se halla en los automóviles modernos.
- Humane Reader: dispositivo electrónico de bajo coste con salida de señal de TV que puede manejar una biblioteca de 5000 títulos en una tarjeta microSD.
- The Humane PC: equipo que usa un módulo Arduino para emular un computador personal, con un monitor de televisión y un teclado para computadora.
- Ardupilot: software y hardware de aeronaves no tripuladas.
- ArduinoPhone: un teléfono móvil construido sobre un módulo Arduino.

- Impresoras 3D.

Mecanismo [16]

Se le llama mecanismo a los dispositivos que reciben una energía de entrada y, a través de un sistema de transmisión y transformación de movimientos, realizan un trabajo.

El análisis de un mecanismo se refiere a encontrar las velocidades, aceleraciones y fuerzas en diferentes partes del mismo conocido el movimiento de otra parte. En función del objetivo del análisis pueden emplearse diversos métodos para determinar las magnitudes de interés entre ellos:

- Método de la aceleración relativa
- Método de la velocidad relativa
- Análisis dinámico
- Teoría de control

Sistema de Control [17] [18]

Los Sistemas de control, según la teoría cibernética, se aplican en esencia para los organismos vivos, las máquinas y las organizaciones. Estos sistemas fueron relacionados por primera vez en 1948 por Norbert Wiener en su obra *Cibernética y Sociedad* con aplicación en la teoría de los mecanismos de control. Un sistema de control está definido como un conjunto de componentes que pueden regular su propia conducta o la de otro sistema con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado, de modo que se reduzcan las probabilidades de fallos y se obtengan los resultados buscados.

Hoy en día los procesos de control son síntomas del proceso industrial que estamos viviendo. Estos sistemas se usan típicamente en sustituir un trabajador pasivo que controla un determinado sistema (ya sea eléctrico, mecánico, etc.)

con una posibilidad nula o casi nula de error, y un grado de eficiencia mucho más grande que el de un trabajador. Los sistemas de control más modernos en ingeniería automatizan procesos en base a muchos parámetros y reciben el nombre de controladores de automatización programables (PAC).

Los sistemas de control deben conseguir los siguientes objetivos:

- Ser estables y robustos frente a perturbaciones y errores en los modelos.
- Ser eficiente según un criterio preestablecido evitando comportamientos bruscos e irreales.
- Necesidades de la supervisión de procesos
- Limitaciones de la visualización de los sistemas de adquisición y control.
- Control vs Monitorización
- Control software. Cierre de lazo de control.
- Recoger, almacenar y visualizar información.
- Minería de datos.

Clasificación de los sistemas de control según su comportamiento

Sistema de control de lazo abierto

Es aquel sistema en que solo actúa el proceso sobre la señal de entrada y da como resultado una señal de salida independiente a la señal de entrada, pero basada en la primera. Esto significa que no hay retroalimentación hacia el controlador para que éste pueda ajustar la acción de control. Es decir, la señal de salida no se convierte en señal de entrada para el controlador. Ejemplo 1: el llenado de un tanque usando una manguera de jardín. Mientras que la llave siga abierta, el agua fluirá. La altura del agua en el tanque no puede hacer que la llave se cierre y por tanto no nos sirve para un proceso que necesite de un control de

contenido o concentración. Ejemplo 2: Al hacer una tostada, lo que hacemos es controlar el tiempo de tostado de ella misma entrando una variable (en este caso el grado de tostado que queremos). En definitiva, el que nosotros introducimos como parámetro es el tiempo.

Estos sistemas se caracterizan por:

- Ser sencillos y de fácil concepto.
- Nada asegura su estabilidad ante una perturbación.
- La salida no se compara con la entrada.
- Ser afectado por las perturbaciones. Éstas pueden ser tangibles o intangibles.
- La precisión depende de la previa calibración del sistema.

Sistema de control de lazo cerrado

Son los sistemas en los que la acción de control está en función de la señal de salida. Los sistemas de circuito cerrado usan la retroalimentación desde un resultado final para ajustar la acción de control en consecuencia. El control en lazo cerrado es imprescindible cuando se da alguna de las siguientes circunstancias:

- Cuando un proceso no es posible de regular por el hombre.
- Una producción a gran escala que exige grandes instalaciones y el hombre no es capaz de manejar.
- Vigilar un proceso es especialmente difícil en algunos casos y requiere una atención que el hombre puede perder fácilmente por cansancio o despiste, con los consiguientes riesgos que ello pueda ocasionar al trabajador y al proceso.

Sus características son:

- Ser complejos, pero amplios en cantidad de parámetros.
- La salida se compara con la entrada y le afecta para el control del sistema.
- Su propiedad de retroalimentación.
- Ser más estable a perturbaciones y variaciones internas.

Un ejemplo de un sistema de control de lazo cerrado sería el termostato de agua que utilizamos para bañarnos. Otro ejemplo sería un regulador de nivel de gran sensibilidad de un depósito. El movimiento de la boya produce más o menos obstrucción en un chorro de aire o gas a baja presión. Esto se traduce en cambios de presión que afectan a la membrana de la válvula de paso, haciendo que se abra más cuanto más cerca se encuentre del nivel máximo.

Tipos de sistemas de control

Los sistemas de control son agrupados en tres tipos básicos:

Hechos por el hombre.

Como los sistemas eléctricos o electrónicos que están permanentemente capturando señales de estado del sistema bajo su control y que al detectar una desviación de los parámetros pre-establecidos del funcionamiento normal del sistema, actúan mediante sensores y actuadores, para llevar al sistema de vuelta a sus condiciones operacionales normales de funcionamiento. Un claro ejemplo de este será un termostato, el cual capta consecutivamente señales de temperatura. En el momento en que la temperatura desciende o aumenta y sale del rango, este actúa encendiendo un sistema de refrigeración o de calefacción.

1.1 Por su causalidad pueden ser: causales y no causales. Un sistema es causal si existe una relación de causalidad entre las salidas y las entradas del sistema, más explícitamente, entre la salida y los valores futuros de la entrada.

1.2 Según el número de entradas y salidas del sistema, se denominan: por su comportamiento

1.2.1 De una entrada y una salida o SISO (single input, single output).

1.2.2 De una entrada y múltiples salidas o SIMO (single input, múltiple output).

1.2.3 De múltiples entradas y una salida o MISO (múltiple input, single output).

1.2.4 De múltiples entradas y múltiples salidas o MIMO (múltiple input, múltiple output).

1.3 Según la ecuación que define el sistema, se denomina:

1.3.1 Lineal, si la ecuación diferencial que lo define es lineal.

1.3.2 No lineal, si la ecuación diferencial que lo define es no lineal.

1.4 Las señales o variables de los sistemas dinámicos son función del tiempo. Y de acuerdo con ello estos sistemas son:

1.4.1 De tiempo continuo, si el modelo del sistema es una ecuación diferencial, y por tanto el tiempo se considera infinitamente divisible. Las variables de tiempo continuo se denominan también analógicas.

1.4.2 De tiempo discreto, si el sistema está definido por una ecuación por diferencias. El tiempo se considera dividido en períodos de valor constante. Los valores de las variables son digitales (sistemas binario, hexadecimal, etc), y su valor solo se conoce en cada período.

1.4.3 De eventos discretos, si el sistema evoluciona de acuerdo con variables cuyo valor se conoce al producirse un determinado evento.

1.5 Según la relación entre las variables de los sistemas, diremos que:

1.5.1 Dos sistemas están acoplados, cuando las variables de uno de ellos están relacionadas con las del otro sistema.

1.5.2 Dos sistemas están desacoplados, si las variables de ambos sistemas no tienen ninguna relación.

1.6 En función de la evolución de las variables de un sistema en el tiempo y el espacio, pueden ser:

1.6.1 Estacionarios, cuando sus variables son constantes en el tiempo y en el espacio.

1.6.2 No estacionarios, cuando sus variables no son constantes en el tiempo o en el espacio.

1.7 Según sea la respuesta del sistema (valor de la salida) respecto a la variación de la entrada del sistema:

1.7.1 El sistema se considera estable cuando ante cualquier señal de entrada acotada, se produce una respuesta acotada de la salida.

1.7.2 El sistema se considera inestable cuando existe por lo menos una entrada acotada que produzca una respuesta no acotada de la salida.

1.8 Si se comparan o no, la entrada y la salida de un sistema, para controlar esta última, el sistema se denomina:

1.8.1 Sistema en lazo abierto, cuando la salida para ser controlada, no se compara con el valor de la señal de entrada o señal de referencia.

1.8.2 Sistema en lazo cerrado, cuando la salida para ser controlada, se compara con la señal de referencia. La señal de salida que es llevada junto a la señal de entrada, para ser comparada, se denomina señal de feedback o de retroalimentación.

1.9 Según la posibilidad de predecir el comportamiento de un sistema, es decir su respuesta, se clasifican en:

1.9.1 Sistema determinista, cuando su comportamiento futuro es predecible dentro de unos límites de tolerancia.

1.9.2 Sistema estocástico, si es imposible predecir el comportamiento futuro. Las variables del sistema se denominan aleatorias.

Naturales.

Incluyendo sistemas biológicos. Por ejemplo, los movimientos corporales humanos como el acto de indicar un objeto que incluye como componentes del sistema de control biológico los ojos, el brazo, la mano, el dedo y el cerebro del hombre. En la entrada se procesa el movimiento y la salida es la dirección hacia la cual se hace referencia.

Hechos por el hombre y naturales.

Cuyos componentes están unos hechos por el hombre y los otros son naturales. Se encuentra el sistema de control de un hombre que conduce su vehículo. Éste sistema está compuesto por los ojos, las manos, el cerebro y el vehículo. La entrada se manifiesta en el rumbo que el conductor debe seguir sobre la vía y la salida es la dirección actual del automóvil. Otro ejemplo puede ser las decisiones que toma un político antes de unas elecciones. Éste sistema está compuesto por ojos, cerebro, oídos, boca. La entrada se manifiesta en las promesas que anuncia el político y la salida es el grado de aceptación de la propuesta por parte de la población.

De cualquier tipo.

Un sistema de control puede ser neumático, eléctrico, mecánico o de cualquier tipo, su función es recibir entradas y coordinar una o varias respuestas según su lazo de control (para lo que está programado).

Control Predictivo.

Son los sistemas de control que trabajan con un sistema predictivo, y no activo como el tradicional (ejecutan la solución al problema antes de que empiece a afectar al proceso). De esta manera, mejora la eficiencia del proceso contrarrestando rápidamente los efectos.

Características

Señal de Corriente de Entrada: Considerada como estímulo aplicado a un sistema desde una fuente de energía externa con el propósito de que el sistema produzca una respuesta específica.

Señal de Corriente de Salida: Respuesta obtenida por el sistema que puede o no relacionarse con la respuesta que implicaba la entrada.

Variable Manipulada: Es el elemento al cual se le modifica su magnitud, para lograr la respuesta deseada. Es decir, se manipula la entrada del proceso.

Variable Controlada: Es el elemento que se desea controlar. Se puede decir que es la salida del proceso.

Conversión: Mediante receptores se generan las variaciones o cambios que se producen en la variable.

Variaciones Externas: Son los factores que influyen en la acción de producir un cambio de orden correctivo.

Fuente de Energía: Es la que entrega la energía necesaria para generar cualquier tipo de actividad dentro del sistema.

Retroalimentación: La retroalimentación es una característica importante de los sistemas de control de lazo cerrado. Es una relación secuencial de causas y efectos entre las variables de estado. Dependiendo de la acción correctiva que tome el sistema, este puede apoyar o no una decisión, cuando en el sistema se produce un retorno se dice que hay una retroalimentación negativa; si el sistema apoya la decisión inicial se dice que hay una retroalimentación positiva.

Variables de fase: Son las variables que resultan de la transformación del sistema original a la forma canónica controlable. De aquí se obtiene también la matriz de controlabilidad cuyo rango debe ser de orden completo para controlar el sistema.

La ingeniería en los sistemas de control.

Los problemas considerados en la ingeniería de los sistemas de control, básicamente se tratan mediante dos pasos fundamentales como son:

1. El análisis.
2. El diseño.

En el análisis se investiga las características de un sistema existente. Mientras que en el diseño se escogen los componentes para crear un sistema de control que posteriormente ejecute una tarea particular. Existen dos métodos de diseño:

1. Diseño por análisis.
2. Diseño por síntesis.

El diseño por análisis

Modifica las características de un sistema existente o de un modelo estándar del sistema y el diseño por síntesis en el cual se define la forma del sistema a partir de sus especificaciones.

La representación de los problemas en los sistemas de control se lleva a cabo mediante tres representaciones básicas o modelos:

1. Ecuaciones diferenciales, integrales, derivadas y otras relaciones matemáticas.
2. Diagramas en bloque.
3. Gráficas en flujo de análisis.

Los diagramas en bloque y las gráficas de flujo son representaciones gráficas que pretenden el acortamiento del proceso correctivo del sistema, sin importar si está caracterizado de manera esquemática o mediante ecuaciones matemáticas. Las ecuaciones diferenciales y otras relaciones matemáticas, se emplean cuando se requieren relaciones detalladas del sistema. Cada sistema de control se puede representar teóricamente por sus ecuaciones matemáticas. El uso de operaciones matemáticas es patente en todos los controladores de tipo P, PI y PID, que debido a la combinación y superposición de cálculos matemáticos ayuda a controlar circuitos, montajes y sistemas industriales para así ayudar en el perfeccionamiento de los mismos.

Actuadores y Sensores.

Actuadores

Un actuador es un dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado. Este recibe la orden de un regulador o controlador y en función a ella genera la orden para activar un elemento final de control como, por ejemplo, una válvula.

Existen varios tipos de actuadores como son:

- Electrónicos
- Hidráulicos

- Neumáticos
- Eléctricos

Los actuadores hidráulicos, neumáticos y eléctricos son usados para manejar aparatos mecatrónicos. Por lo general, los actuadores hidráulicos se emplean cuando lo que se necesita es potencia, y los neumáticos son simples posicionamientos. Sin embargo, los hidráulicos requieren mucho equipo para suministro de energía, así como de mantenimiento periódico. Por otro lado, las aplicaciones de los modelos neumáticos también son limitadas desde el punto de vista de precisión y mantenimiento.

Actuadores Eléctricos

La estructura de un actuador eléctrico es simple en comparación con la de los actuadores hidráulicos y neumáticos, ya que sólo requieren de energía eléctrica como fuente de poder. Como se utilizan cables eléctricos para transmitir electricidad y las señales, es altamente versátil y prácticamente no hay restricciones respecto a la distancia entre la fuente de poder y el actuador.

Existe una gran cantidad de modelos y es fácil utilizarlos con motores eléctricos estandarizados según la aplicación. En la mayoría de los casos es necesario utilizar reductores, debido a que los motores son de operación continua.

Utilización de un pistón eléctrico para el accionamiento de una válvula pequeña.

La forma más sencilla para el accionamiento con un pistón, sería la instalación de una palanca solidaria a una bisagra adherida a una superficie paralela al eje del pistón de accionamiento y a las entradas roscadas.

Existen Alambres Musculares®, los cuales permiten realizar movimientos silenciosos sin motores. Es la tecnología más innovadora para robótica y automática, como así también para la implementación de pequeños actuadores.

Moto-reductores [19]

Los reductores y motor reductores mecánicos de velocidad se pueden contar entre los inventos más antiguos de la humanidad y aún en estos tiempos del siglo XXI se siguen utilizando prácticamente en cada máquina que tengamos a la vista, desde el más pequeño reductor o motor reductor capaz de cambiar y combinar velocidades de giro en un reloj de pulsera, cambiar velocidades en un automóvil, hasta enormes motor reductores capaces de dar tracción en buques de carga, molinos de cemento, grandes máquinas cavadoras de túneles o bien en molinos de caña para la fabricación de azúcar.

Un motor reductor tiene un motor acoplado directamente, el reductor no tiene un motor acoplado directamente.

La sencillez del principio de funcionamiento y su grado de utilidad en una gran variedad de aplicaciones es lo que ha construido la trascendencia de este invento al través de los siglos.

A continuación se dan los principios básicos de un reductor o motor reductor de velocidad:

Supongamos que la rueda "A" de la fig.13.1 tiene un diámetro de 5 cm. Su perímetro será entonces de $5 \times 3.1416 = 15.71$ cm. El perímetro es la longitud total del envolvente de la rueda. Una rueda "B" de 15 cm de diámetro y 47.13 cm de perímetro (15×3.1416) está haciendo contacto con el perímetro de la rueda "A" (fig. 13.2)

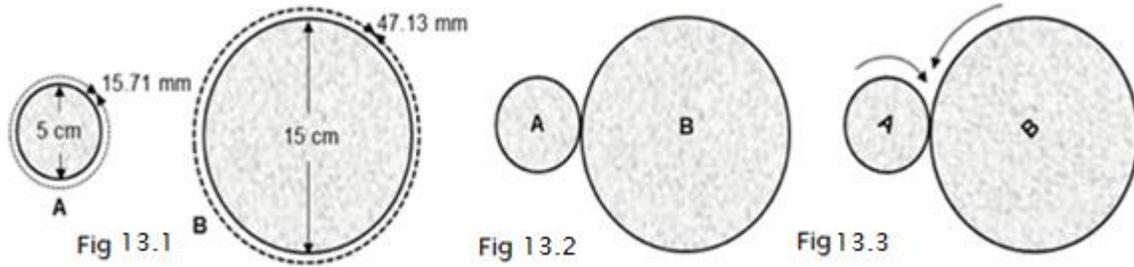


Figura 13 - Moto-reductor [19]

Concepto de relación de reducción en un Motor reductor

En la fig. 13.3, cuando gira la rueda “A” hará que a su vez gire la rueda “B” pero sucederá que por cada tres vueltas que dé “A”, la rueda “B” solamente dará una vuelta, esto es, el diámetro de “B” dividido por el diámetro de “A” ($15/5 = 3$). Este número 3 será la relación de reducción de este reductor o motor reductor elemental y se indica como 3:1.

Con esta simple combinación se ha logrado disminuir la velocidad de rotación de la rueda “B” a la tercera parte de la velocidad de la rueda “A”. Si a la combinación de ruedas antes descrito encadenamos otras ruedas adicionales entonces cada vez lograremos una velocidad cada vez menor hasta donde sea necesario para la aplicación y puede ser 6:1, 30:1, 100:1 o aún mayor para lograr velocidades muy pequeñas que se pudieran necesitar y que, por ejemplo, la rueda “A” tuviera que girar cientos de veces para que la última rueda girara una sola vez. En este caso tendremos un motor reductor de varios trenes de reducción, entendiendo como 1 tren de reducción a un par de ruedas. Con 6 ruedas tendríamos tres trenes de engranes.

Con este sistema de reducción no solamente disminuimos la velocidad de “B” a un giro más lento que es útil para la mayoría de las aplicaciones sino que al mismo tiempo estaremos aumentando el “par” o “torque” en la última rueda del motor

reductor que generalmente se conoce como la rueda de salida a la que va ensamblada la “flecha de salida” del reductor o motor reductor.

Concepto de par o torque en un Motor reductor

El “torque” o “par” es una fuerza de giro; Por ejemplo la fuerza de giro de la flecha de salida del motor reductor; es también la fuerza de giro en la flecha de un motor. No es simplemente una fuerza expresada en kilogramos, libras, onzas, Newton, etc.; tampoco es una potencia en HP o en Kilowatts. Es un fuerza de giro cuyas unidades son kilogramos – metro, o libra – pie, o libras – pulgada, o Newton – metro, etc.

Este torque o par mezclado con un tiempo de realización, aplicación o ejecución es

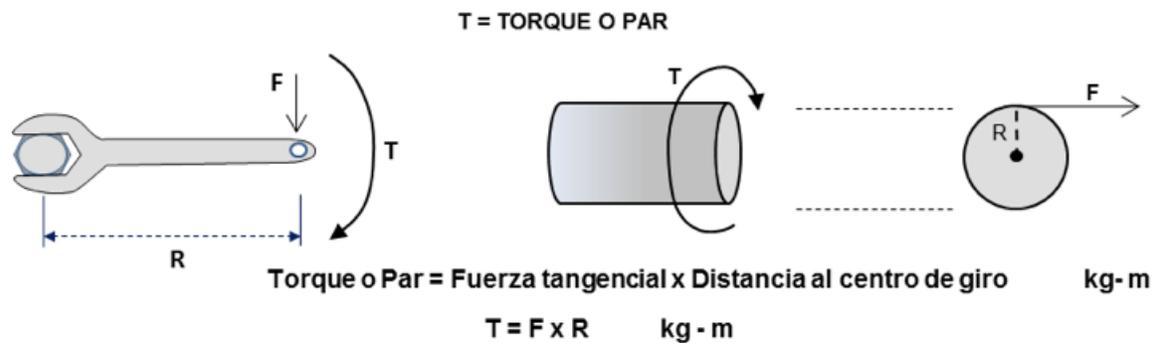


Figura 14 – Torque [19]

Entonces que se convierte en una “potencia”.

Un motor eléctrico tiene una determinada potencia en HP y tiene una cierta velocidad de operación a la cual gira la flecha de salida, por ejemplo 1800 Revoluciones por Minuto (RPM). Estas dos características: Velocidad y Potencia

llevan aparejado un cierto “torque” o “par” que puede liberar el motor. Es precisamente el “par” lo que permitirá que podamos o no girar una determinada carga, cuanto más alto el “par” más grande será la carga que podamos girar. El que tan rápido podamos hacerlo dependerá de la potencia del motor reductor. Las dos características están interrelacionadas y dependen una de la otra.

Esta combinación de potencia, par y velocidad en un motor o motor reductor está regida por la siguiente fórmula:

$$PAR \text{ (en kg.m)} = \frac{POTENCIA \text{ (en HP)} \times 716}{VELOCIDAD \text{ DE GIRO DE LA FLECHA DEL MOTOR (RPM)}}$$

RPM = numero de giros de la flecha por minuto

$$T = \frac{HP \times 716}{RPM} \text{ en kg.m}$$

Como podrá verse en la fórmula, para una potencia dada, cuanto más baja sea la velocidad final de giro de la flecha del motor reductor, más alto será el par aunque la potencia siga siendo la misma. Inversamente: Cuanta más alta sea la velocidad final del reductor o motor reductor, tanto más bajo será el par aun cuando la potencia sea la misma.

DISEÑO METODOLOGICO

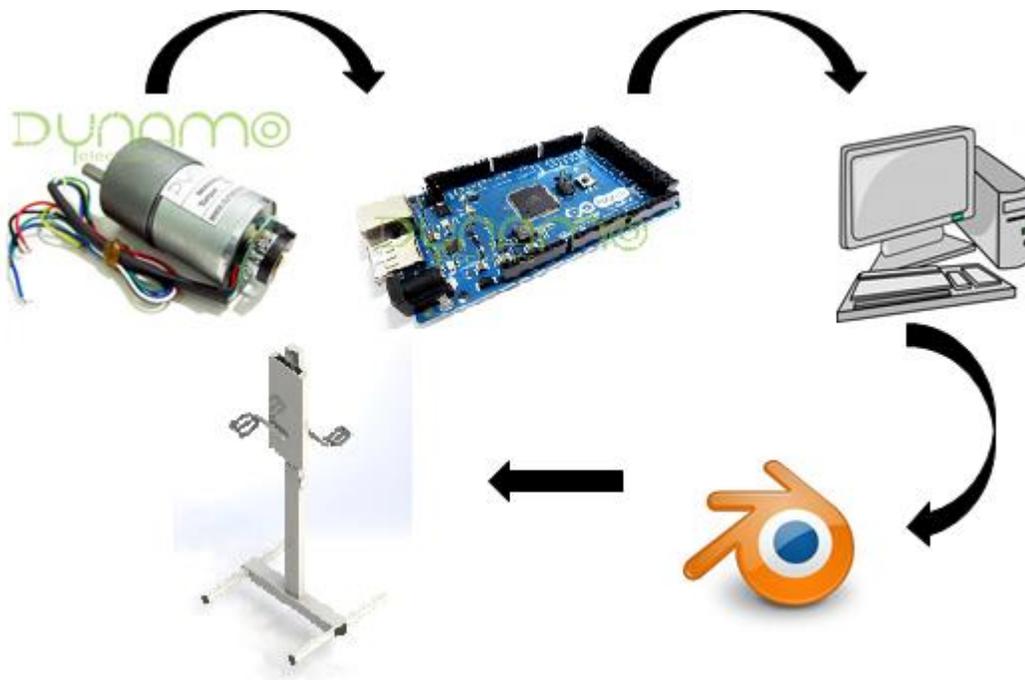


Figura 15 - Diseño Metodológico

Análisis bibliográfico y estudio documental.

Esta etapa encerrara la recopilación de los documentos y estudios realizados sobre el desarrollo y venta de Maquinas de Recuperación de Extremidades Superiores fisioterapéuticas, con el fin de analizar e interpretar esta información para ser aplicada en el desarrollo del diseño del proyecto.

A su vez este estudio tiene como fin aportar información básica para el desarrollo del diseño asistido por computador.

Selección de sensores y actuadores.

En esta etapa se realizara un estudio acerca de los sensores y actuadores necesarios para el diseño de la rueda de rehabilitación, buscando diferentes modelos para analizar cual se acopla mejor al proyecto.

Bocetos y Diseño en CAD.

Se revisaran modelos que hay en el mercado cual es el mejor y que mejoras se le pueden adaptar, de ahí empezar a realizar bocetos y luego el proceso de diseño para la construcción de nuestra Maquina de Recuperación de Extremidades Superiores.

Estudio del control y mecanismos.

Se realizara el proceso de análisis de cuál de los mecanismos son los que mejor se adaptan a nuestro producto y por ende el estudio de control de velocidad que queremos darle a la Maquina de Recuperación de Extremidades Superiores.

Diseño, Simulación e Implementación

Aquí estaremos en la etapa de pruebas donde podemos ver la simulación del comportamiento de la variable del proceso su tiempo de establecimiento y la acción de control de la máquina con respecto a perturbaciones que pueda presentar.

Especificaciones

Se hará en detalle un informe de posibles soluciones a nuestros materiales que se podrían utilizar, también toda la parte de control que lleve nuestro producto y cálculos de cuánto podría salir la construcción de nuestra rueda.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

CRONOGRAMA DE PROYECTO DE GRADO								
ACTIVIDAD	FEB	MAR	ABR	MAY	JUL	AGO	SEPT	OCT
Planteamiento del Problema								
Analisis Bibliografico								
Desarrollo de Bocetos								
Revision de Modelos								
Estudio Cinematica								
Selección de Sensores y Actuadores								
Diseño CAD								
Estudio del Control								
Construccion Fisica								
Analisis Resultados								
Conclusiones								

Figura 16 - Cronograma Actividades

DESARROLLO DEL PROYECTO

Diseño Mecánico

Para obtener el producto final se realizaron una serie de prototipos, con el fin de determinar cuál de estos se ajustaba más, como la solución al problema planteado anteriormente.

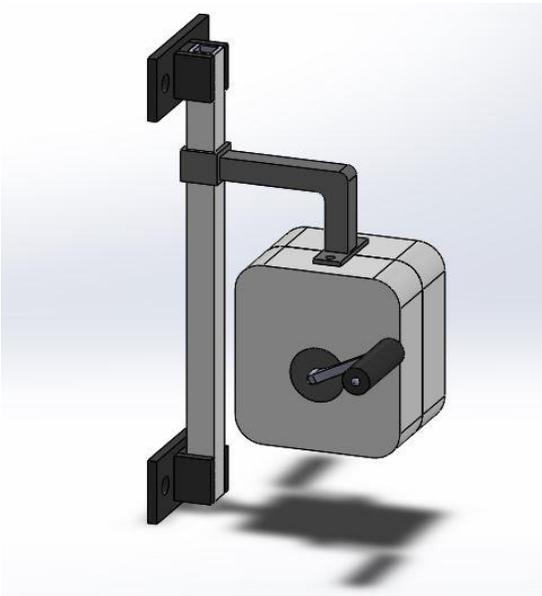


Figura 17 - Prototipo Inicial Vista Isométrica

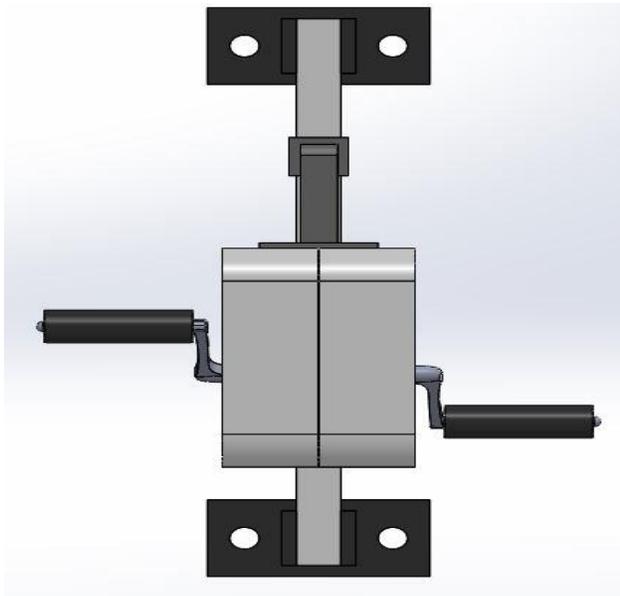


Figura 18 - Prototipo Inicial Vista Frontal

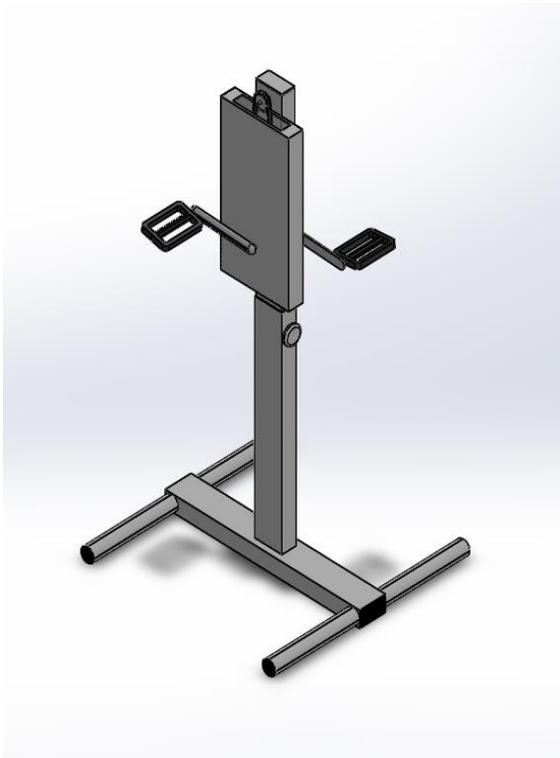


Figura 19 - Prototipo Final Vista Isométrica

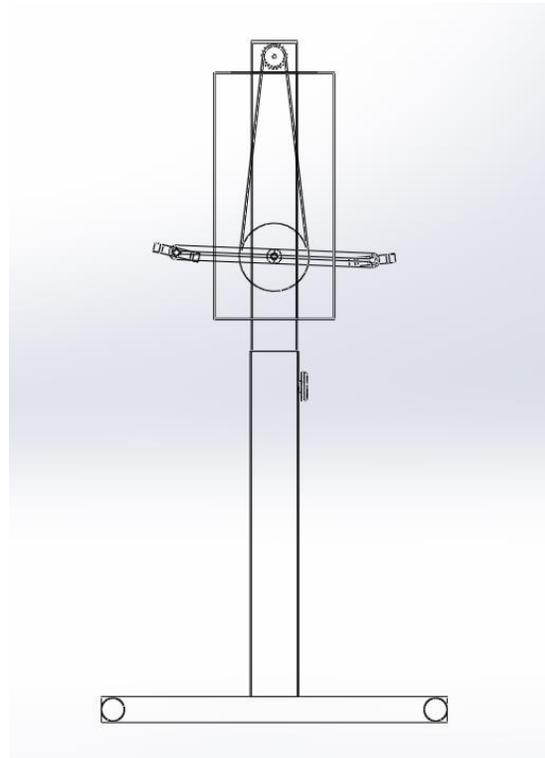


Figura 20 - Prototipo Final Vista Frontal

En el Anexo 2 se encuentra todas las características mecánicas del prototipo y las dimensiones de construcción.

Selección de Actuadores

Para este prototipo es necesario un motor que generara el movimiento rotatorio para la rehabilitación de los pacientes. Para la selección de este, se realiza un análisis estático del mecanismo teniendo en cuenta las características del peso de un paciente promedio.

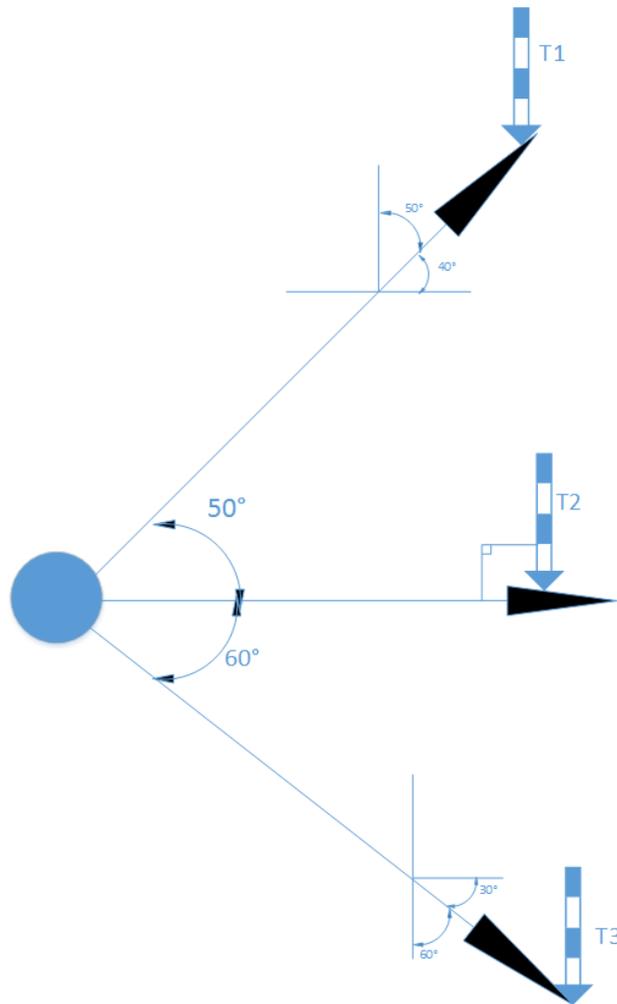


Figura 21 - Diagrama de Cuerpo Libre

$$T1 = R(M * G)\text{Sen } 40^\circ$$

$$T2 = R(M * G)$$

$$T3 = R(M * G)\text{Sen } 30^\circ$$

Donde M es la masa del brazo completo en inercia y según la tabla que vimos anteriormente en porcentaje masa según el peso de la persona es:

Brazo 2.6%

Antebrazo 1.6%

Mano 0.7%

Total brazo completo = Brazo + Antebrazo + Mano = 4.9 %

Persona promedio = 85 kgs

*masa del brazo = 85 kgs * 0.049 = 4.165 kgs*

Hacemos los cálculos en T2 donde se produce la mayor fuerza de torque.

$$T2 = R(M * G)$$

$$T2 = 0.17 \text{ m} (4.165 * 9.81) = 6.9459 \text{ N.m}$$

Es necesario realizar la conversión de unidades a Kg.F.

$$1 \text{ N} = 0.1019716 \text{ Kg.F}$$

$$T2 = 6.9459 * 0.1019716$$

$$T2 = 0.7082 \text{ Kg.F.m}$$

Y de nuevo realizamos conversión de unidades a cm.

$$T2 = 0.7082 \text{ Kg.F.m} * \frac{100 \text{ cm}}{\text{m}}$$

$$T2 = 70.82 \text{ Kg.F.cm}$$

Este es el torque en el eje conducido, para tener el torque en el eje conductor lo dividimos en 3, ya que la relación de cadena entre estas, es de 1:3.

$$T = \frac{70.82}{3} = 23.60 \text{ Kg.F.cm}$$

Este es el torque mínimo que necesitamos tenga el motor para salir de la inercia por el peso del brazo.

Teniendo esto procedemos a la escogencia del motor de la tabla 3.

Modelo	Precio	Tension	Velocidad	Cupla	Pot. eje	Material	Sistema	Servicio
	\$		RPM	Kgf*cm	Hp			
MR8-6400-1224	\$ 125	24 VCC	6.400,0	30,00	0,0107	Plástico	Planetarios	Normal
MR85-0,8	\$ 130	24 VCC	0,8	30,00	0,0309	Plástico	Planetarios	Normal
MR85-1,2	\$ 130	24 VCC	1,2	30,00	0,0309	Plástico	Planetarios	Normal
MR85-1,8	\$ 130	24 VCC	1,8	30,00	0,0309	Plástico	Planetarios	Normal
MR85-2,7	\$ 130	24 VCC	2,7	30,00	0,0309	Plástico	Planetarios	Normal
MR85-4	\$ 130	24 VCC	4,0	30,00	0,0309	Plástico	Planetarios	Normal
MR85-6	\$ 130	24 VCC	6,0	30,00	0,0309	Plástico	Planetarios	Normal
MR85-7,5	\$ 130	24 VCC	7,5	30,00	0,0309	Plástico	Planetarios	Normal
MR85-11	\$ 130	24 VCC	11,0	30,00	0,0309	Plástico	Planetarios	Normal
MR85-17	\$ 130	24 VCC	17,0	30,00	0,0309	Plástico	Planetarios	Normal
MR85-25	\$ 130	24 VCC	25,0	30,00	0,0309	Plástico	Planetarios	Normal
MR85-30	\$ 130	24 VCC	30,0	30,00	0,0309	Plástico	Planetarios	Normal
MR85-44	\$ 130	24 VCC	44,0	30,00	0,0309	Plástico	Planetarios	Normal
MR85-66	\$ 130	24 VCC	66,0	30,00	0,0309	Plástico	Planetarios	Normal
MR105-30	\$ 600	24 VCC	30,0	61,24	0,0309	Metálico	Planetarios	Normal
MR105-44	\$ 600	24 VCC	44,0	40,82	0,0309	Metálico	Planetarios	Normal
MR105-66	\$ 600	24 VCC	66,0	27,22	0,0309	Metálico	Planetarios	Normal
MR107-66	\$ 750	24 VCC	66,0	54,24	0,0710	Metálico	Planetarios	Normal
MR107-100	\$ 750	24 VCC	100,0	36,16	0,0710	Metálico	Planetarios	Normal
MR107-177	\$ 750	24 VCC	177,0	20,34	0,0710	Metálico	Planetarios	Normal
MR10-417-47	\$ 990	24 VCC	47,0	59,13	0,0390	Metálico	Planetarios	Larga duración
MR10-417-71	\$ 990	24 VCC	71,0	39,42	0,0390	Metálico	Planetarios	Larga duración
MR10-417-106	\$ 990	24 VCC	106,0	26,28	0,0390	Metálico	Planetarios	Larga duración
MR10-437-103	\$ 990	24 VCC	103,0	59,13	0,0760	Metálico	Planetarios	Normal
MR10-437-154	\$ 990	24 VCC	154,0	39,42	0,0760	Metálico	Planetarios	Normal
MR10-437-231	\$ 990	24 VCC	231,0	26,28	0,0760	Metálico	Planetarios	Normal

Tabla 3 - Motores

Se escoge el motor MR105-44 porque su material es metálico y en el mismo rango de precio podemos escoger un motor con un torque mayor para tener cierta luz con respecto a los cálculos.

El motor se observa en la figura 20 y su hoja de referencia en la figura 21.



Figura 22 - MR105-44

El sensor es un Encoder incremental produce una salida digital relacionada con la posición de un eje giratorio y proporcionan elementos de retroalimentación en el sistema de control de lazo cerrado y viene con el motor. [21]



Figura 23 - Encoder Incremental [21]

Diseño Electrónico

De acuerdo al motor seleccionado, podemos tomar como supuesto que la corriente de rotor bloqueado es tres veces más que la corriente nominal, pero según la hoja de datos obtenemos que la corriente nominal es de 1.5 A, y la corriente de motor bloqueado es de 6.5 A, por lo tanto, se necesitó implementar una etapa de potencia que pudiera cumplir con estas características, y para esto se usó la tarjeta de potencia *Pololu*, que tiene capacidad para soportar hasta 10 A en carga continua.



Figura 24 - Tarjeta de Potencia Pololu VN3SP30 [20]

Para la etapa de control se trabajó con la tarjeta Arduino Mega ADK, que permite la programación de interrupciones, para calcular la velocidad por medio del

Encoder, de señales PWM, para variar la velocidad de giro del motor, de puertos de comunicación serial, para la transmisión de datos, y finalmente, la implementación del controlador diseñado para la regulación de velocidad.

Para la etapa de control se trabajó con la tarjeta Arduino Mega ADK, que permite la programación de interrupciones, para calcular la velocidad por medio del Encoder, de señales PWM, para variar la velocidad de giro del motor, de puertos de comunicación serial, para la transmisión de datos, y finalmente, la implementación del controlador diseñado para la regulación de velocidad.

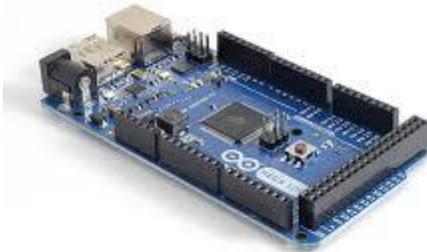


Figura 25 - Tarjeta Arduino ADK

Teniendo en cuenta la fácil manipulación que debe tener este dispositivo de rehabilitación, se decidió implementar una comunicación con dispositivos Android, que permita al usuario interactuar y modificar los parámetros de operación de la máquina, ver anexo 2. De acuerdo a lo anterior, se hizo necesario agregar un módulo de comunicación bluetooth para poder crea la interfaz hombre – Máquina.

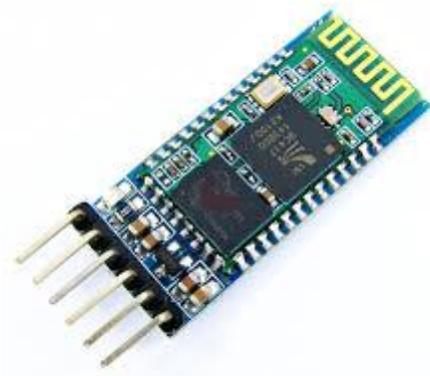


Figura 26 - Módulo de Comunicación Bluetooth

Diseño de Controlador

Para diseñar el controlador, fue necesario analizar la respuesta transitoria del sistema y para esto, se dio como entrada al sistema un escalón del 80 % de PWM. La respuesta del sistema se muestra en la figura 27.

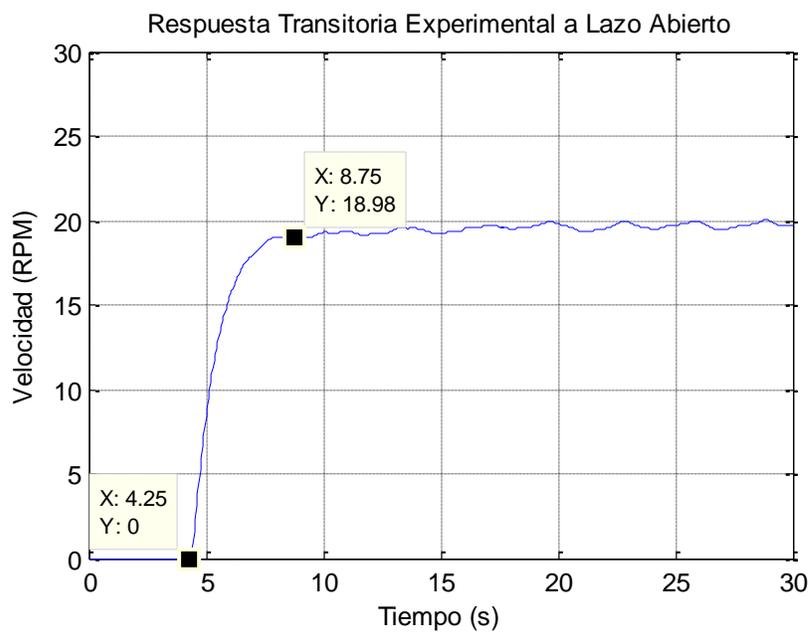


Figura 27 - Respuesta Transitoria Experimental Lazo Abierto

El diseño analítico, se realiza en base una función de transferencia que represente el comportamiento del sistema, y para tener este modelo aproximado se usó la toolbox *Ident* del software MatLab. La respuesta de la aproximación del modelo lineal y su respectivo bestfit (En relación con la respuesta real), se muestra en la figura 28.

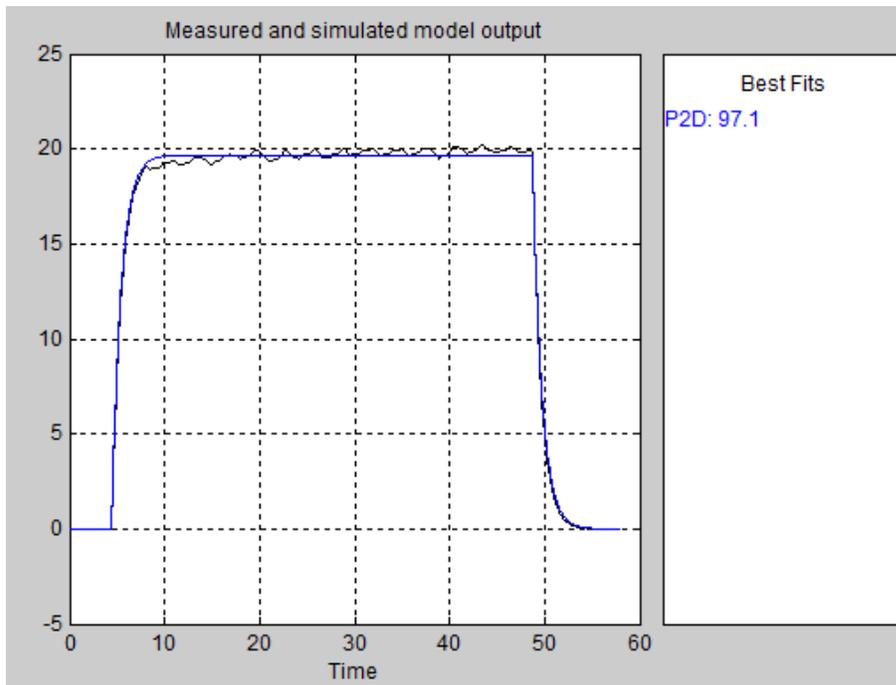


Figura 28 - Best Fit

La función de transferencia resultante del proceso de identificación, se discretizó, debido a que el sistema es de procesamiento digital, con un periodo de muestreo de 50 ms y un retenedor de orden cero. La siguiente ecuación representa la aproximación del modelo lineal en tiempo discreto.

$$g(z) = \frac{0.002096Z^2 + 0.004228Z + 0.0001659}{Z^3 - 1.411Z^2 + 0.4381Z}$$

En la figura 29 se muestra la respuesta transitoria de la función de transferencia identificada, y se puede observar que las características de tiempo de

establecimiento y valor en estado estable son similares a la real, por lo tanto esta función fue válida para iniciar el diseño del controlador.

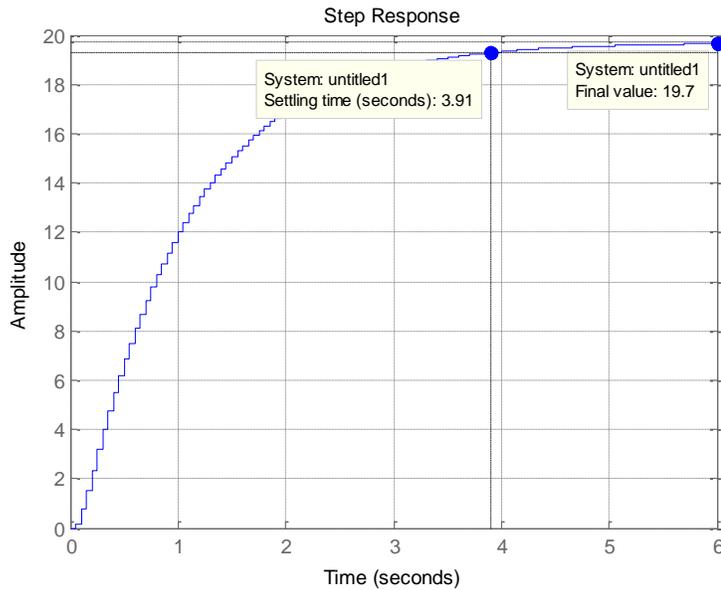


Figura 29 - Respuesta Transitoria

Al ser un sistema de control de velocidad, desde aplicaciones pequeñas hasta en la industria, existe una tendencia de implementar controladores tipo PI. Para este caso se diseñó bajo esta misma estructura, en donde la respuesta a lazo cerrado muestra que el tiempo de establecimiento aumenta en un segundo, pero garantizando la estabilidad del sistema y que no exista error en estado estable. La respuesta del sistema a lazo cerrado y ecuaciones del controlador diseñado se muestran a continuación.

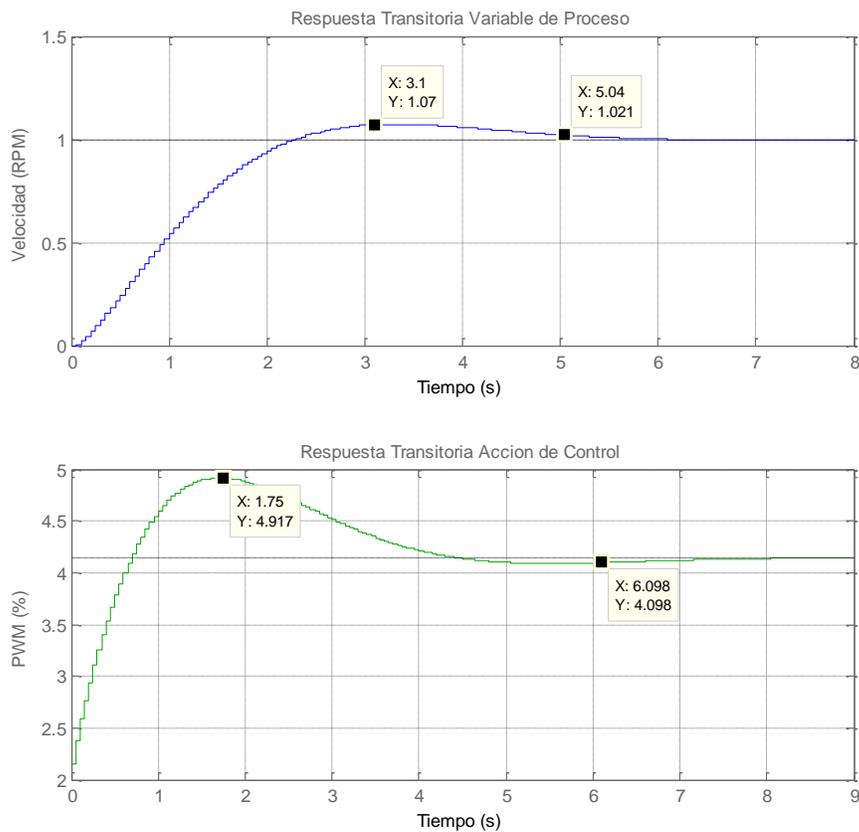


Figura 30 - Respuesta al sistema Lazo Cerrado

Ecuación Controlador PI Diseñado

$$PID(z) = \frac{2.1565 (Z - 0.98)}{Z - 1}$$

Representación Clásica Controlador PI

$$PID(z) = 17.4474 \left(1 + \frac{0.1236}{1 - Z^{-1}} \right)$$

Al comparar la respuesta transitoria a lazo cerrado en simulación y la respuesta del sistema real después de implementar el controlador, se obtuvo que las dos señales tienen el mismo tiempo de levantamiento, la señal del sistema real tiene

un sobrepaso menor y un tiempo de establecimiento menor que la señal del sistema en simulación, siendo la diferencia entre estos valores menores un RPM y un segundo respectivamente.

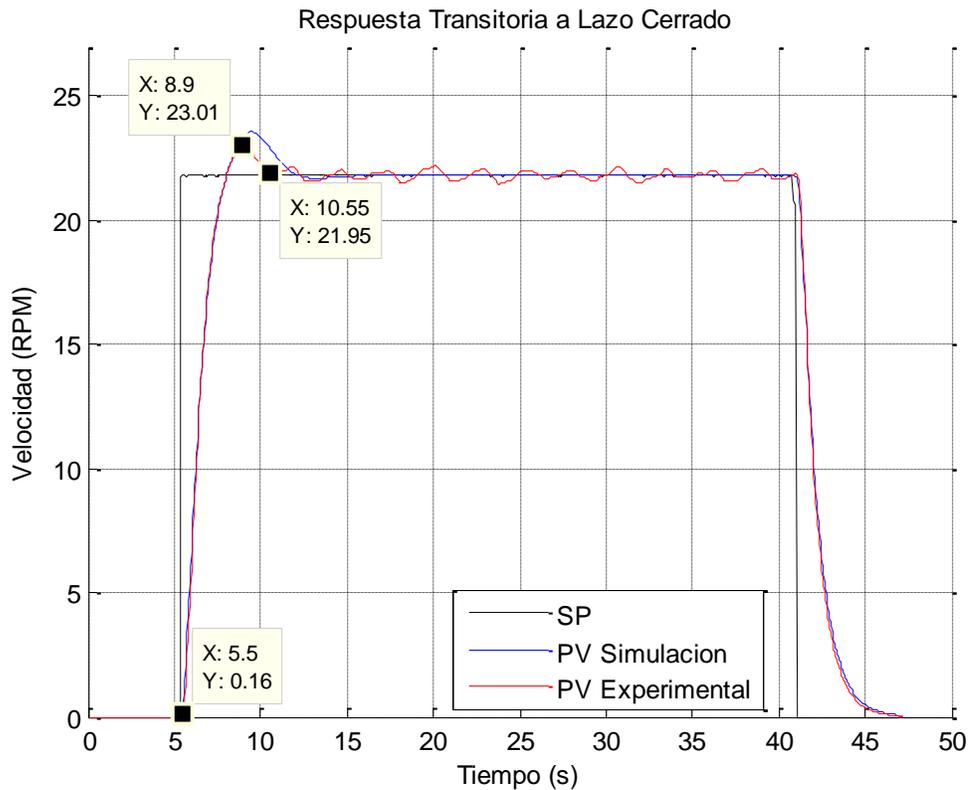


Figura 31 - Comparación de Respuestas Transitorias

El sistema real también fue evaluado ante diferentes set points, y ante valores altos, se observa que la respuesta no presenta sobrepaso y esto es debido a que la acción de control se satura para ese valor, sin embargo ante valores sobre la zona sobre la cual fue diseñada el controlador, se mantiene la respuesta transitoria analizada anteriormente. La señal de respuesta ante diferentes set points se muestra a continuación.

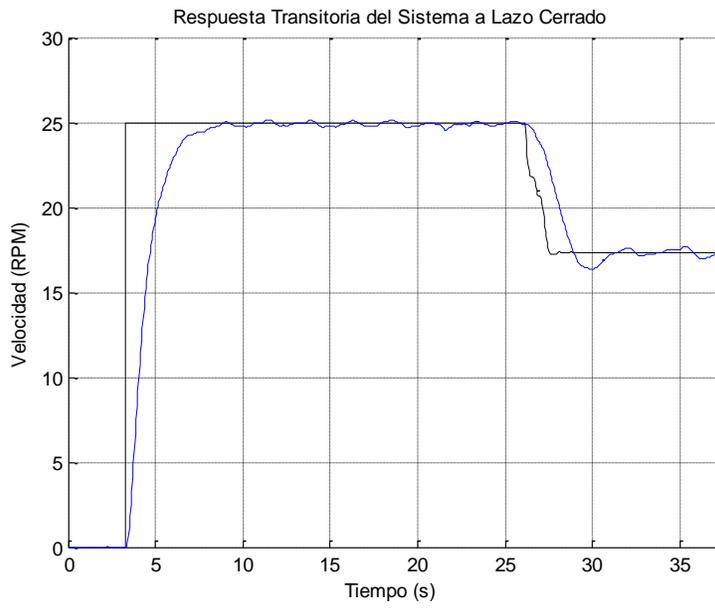
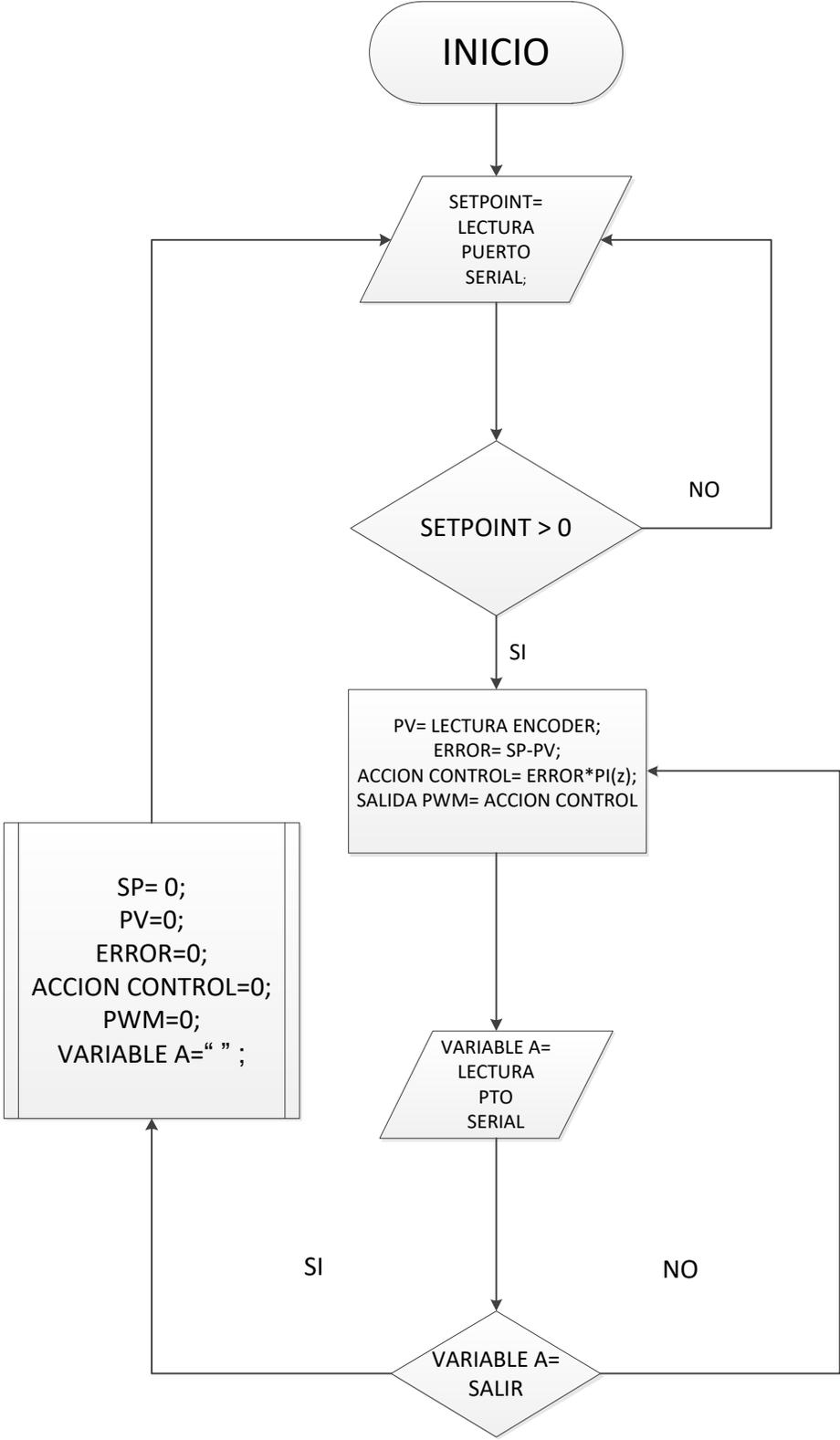


Figura 32 - Respuesta Transitoria ante otro set point

Programación de la Tarjeta de Control Arduino ADK



PRESUPUESTO

En la siguiente Tabla encontramos la relación de precios para el proyecto.

Presupuestos	
Producto	Costo
Materiales y Construcción	\$ 500.000,00
Arduino ADK	\$ 197.000,00
Cable USB Tipo B	\$ 2.500,00
Cable USB Micro B para Raspeberry	\$ 9.000,00
Bluetooth JY-MCU	\$ 60.000,00
MOTOREDUCTOR + ENVIO	\$ 190.000,00
HUB - 12 Hub hexagonal 6mm	\$ 20.000,00
Caja Negra	\$ 10.000,00
Cables Arduino	\$ 15.000,00
Tarjeta Potencia Pololu	\$ 160.000,00
Fuente Adaptador	\$ 60.000,00
Total	\$ 1.223.500,00

Tabla 4 – Presupuestos

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al evaluar el funcionamiento del sistema electrónico, se obtuvo que la etapa de potencia fue correctamente seleccionada, pues ante arranque y freno del motor, no existió ningún tipo de recalentamiento del dispositivo, ni tampoco daños en la etapa de procesamiento digital, lo que asegura un óptimo funcionamiento.

Con respecto al controlador de velocidad diseñado para el sistema, bajo la metodología de identificación del mismo, se pudo observar una respuesta transitoria coherente con los criterios de diseño establecidos, comparando graficas experimentales y de simulación, además de permitir una estabilidad constante del sistema que afecta principalmente a los pacientes, pues se les debe asegurar que el dispositivo (maquina) no vaya a provocar lesiones o una recuperación no deseada.

Se pudo observar que la maquina es funcional teniendo en cuenta que solo es un prototipo de pruebas, el diseño es de fácil transporte y se ajusta bien en una sala de recuperación de Fisioterapia. Se logró la comunicación entre cualquier plataforma Android haciendo una interfaz de fácil uso para los usuarios encargados y a si tener visualización de datos para el trabajo realizado por el paciente.

Una de las recomendaciones principales es el cambio de material en las cubiertas por un polímero con propiedades de alta dureza, si se desea utilizar en áreas limpias de trabajo como clínicas y centros de fisioterapia.

También se debe tener en cuenta situar un freno de emergencia en la maquina por si el paciente llega a tener algún accidente mientras hace su rutina. Se visualizó que se deben tener rutinas programadas para los pacientes y estas siempre

arrancar y terminar haciendo una entrada rampa en el control de velocidad de la máquina para que el paciente no sufra daños.

BIBLIOGRAFIA

[1]FISAUDE. *Gustav Zander*. <<http://www.fisaude.com/fisioterapia/articulos-de-opinion/gustav-zander.html>>.

[2]FISIOSTORE. *Physio rueda hombro*. <<http://fisiostore.es/fisioterapia-y-rehabilitacion/physio-rueda-hombro.html>>.

[3]FISIOSTORE. *Physio rueda mini bici*. <<http://fisiostore.es/fisioterapia-y-rehabilitacion/physio-rueda-mini-bici.html>>.

[4]FISIOSTORE. *Physio rueda muñeca*. < <http://fisiostore.es/fisioterapia-y-rehabilitacion/physio-rueda-mu-eca.html>>.

[5]QUESNOT, A., CHANUSSOT, J. *Rehabilitación del miembro superior*; Fumat, Carole., Chanussot, Jean-Claude (Ilustraciones). 1ª ed. Editorial Medica Panamericana.

[6]LUIS BERNAL. *Mecanoterapia*. <<http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion/mecanoterapia.pdf>>.

[7]WIKIPEDIA. *Mecanoterapia* <<http://es.wikipedia.org/wiki/Mecanoterapia>>.

[8]FISSIOTERAPIA. *Que es la Fisioterapia*. <<http://fisioterapia.blogspot.com/p/que-es-fisioterapia.html>>.

[9]HUTER-BECKER, A., SCHEWE, H., HEIPERTZ, W. *Terapia Fisica*; Ed. Paidotribo, 2005. ISBN: 9788480198004.

[10]ERGONAUTAS. *Biomecánica esfuerzos estáticos coplanares.*
<<http://www.ergonautas.upv.es/metodos/biomecanica/biomecanica-ayuda.php>>.

[11]WIKIPEDIA. *Rueda concepto.* <<http://es.wikipedia.org/wiki/Rueda>>.

[12]MYSZKA, David H. *Máquinas y Mecanismos.*; 4 edición. Pearson.

[13]NORTON, Robert L. *Diseño de Maquinaria.*; Navarro Salas, Rodolfo (trad.); Villalobos Luna, José de Jesús., Ruiz Guzmán, Sergio Alberto., Saldaña Sánchez, Sergio., Hernández Fernández, Ángel (rev. téc.). 3ª ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2004. ISBN: 007-2864478.

[14]WIKIPEDIA. *Elementos de Maquinas.*
<http://es.wikipedia.org/wiki/Elementos_de_m%C3%A1quinas>.

[15]ARDUINO. *Arduino.* <<http://www.arduino.cc/>>.

[16]WIKIPEDIA. *Mecanismo.* <<http://es.wikipedia.org/wiki/Mecanismo>>.

[17]KUO, Benjamín C., *Sistemas de Control Automático.*; Núñez, José Luis (trad.); 7ª ed. México: Pearson Prentice-Hall Hispanoamérica S.A, 1996. ISBN: 968-880-723-0.

[18]WIKIPEDIA. *Sistema de Control.*
<http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_control>

[19]POTENCIA ELECTROMECHANICA. *Como Funciona un Reductor o un Motorreductor.* <<http://www.potenciaelectromecanica.com/calculo-de-un-motorreductor/>>.

[20]POLOLU ROBOTICS & ELECTRONICS. *Pololu Dual VNH519 Motor Driver Shield for Arduino*. <<http://www.pololu.com/product/2507>>.

[21]ROCKWELL AUTOMATION. *Enconders Ópticos Incrementales*. <<http://ab.rockwellautomation.com/es/Motion-Control/Incremental-Optical-Encoder>>.

[22]IGNIS. *Motorreductores y Reductores*. <<http://ignismotor.com/DESKTOP/INT-ES/motoreductor.html>>.

Anexos

Anexo 1 – Hoja de Datos Motor [22]



Lr - Largo del reductor para 1 etapa: 46, Cada etapa adicional: 7 mm
 Lm - Largo del motor: Tamaño 5: 64, Tamaño 7: 73
 Dm - Diámetro del motor: Tamaño 5: 37, Tamaño 7: 46

General

Juego Libre (Backlash) menor a 2°
 Cupla de rotura 300 kgf*cm
 Velocidad min / max (RPM) 20% / 200 % Vel.Nom
 Rendimiento aproximado por etapa 95 %
 Cupla Arranque / Bloqueo (aprox.) = Cupla nominal * 4
 Velocidad Vacío (aprox.) = Velocidad Nominal + 15%

Solicitaciones del Eje

Compresión - Tracción 20 Kg
 Esfuerzo Axial Máximo 20 Kg
 Momento Flexor Máximo 3,0 Kg.m

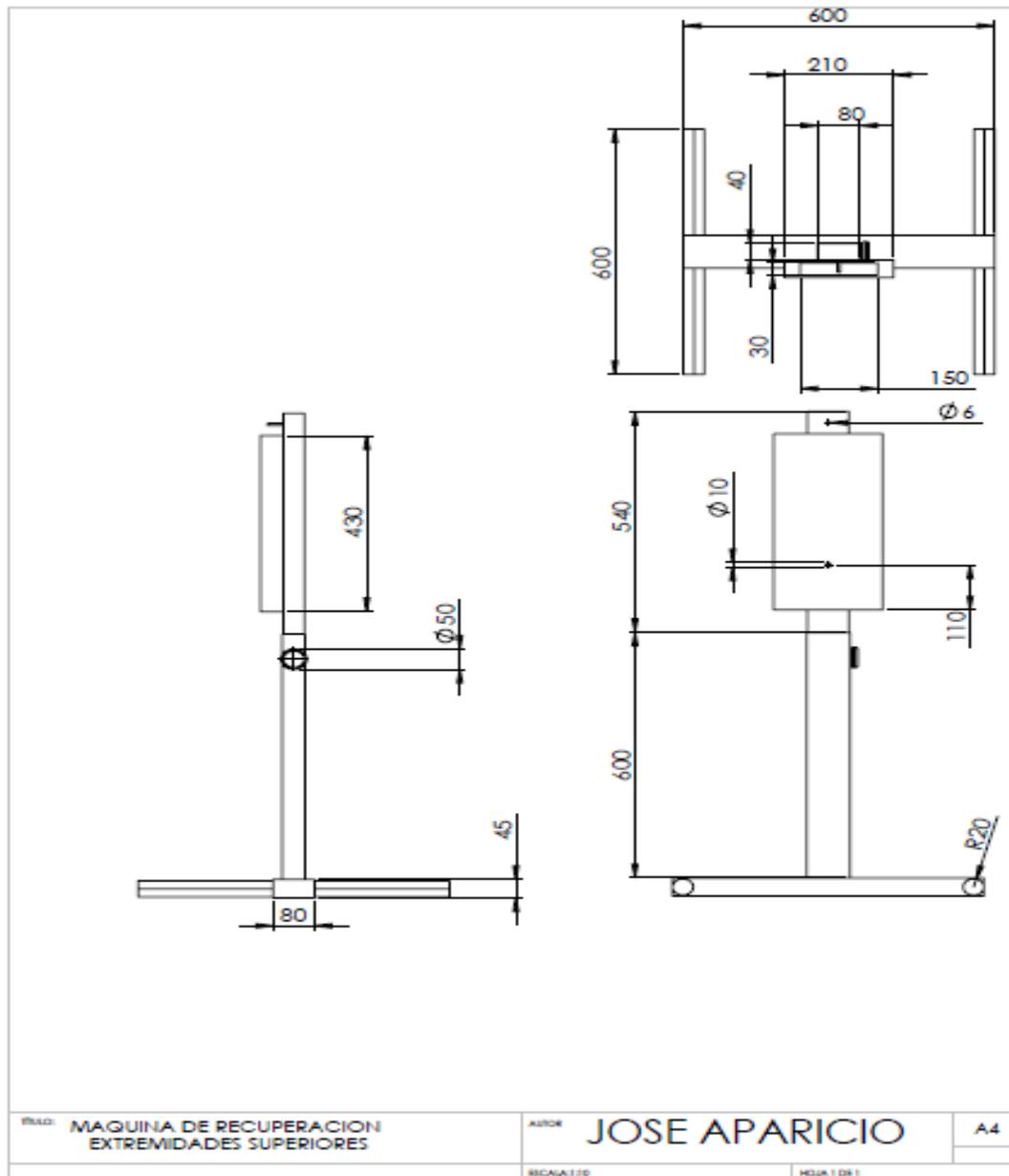
Origen: Argentina / China

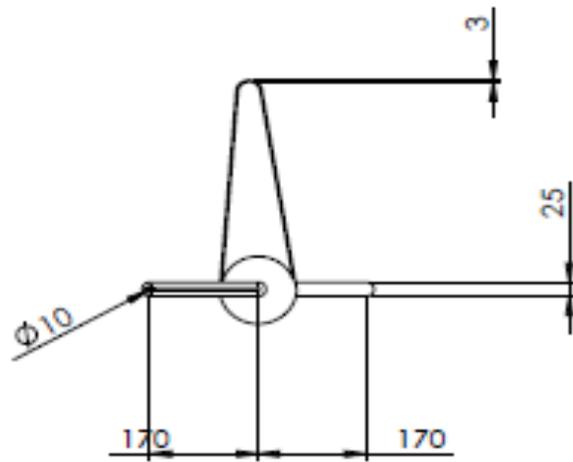
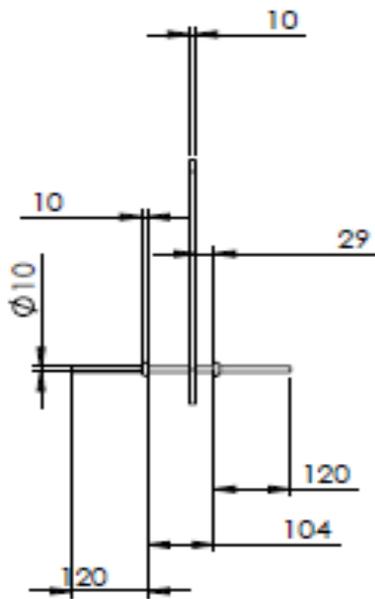
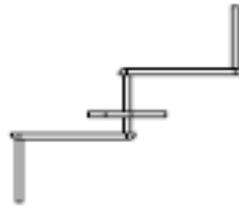
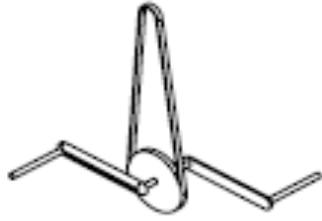
* Se pueden fabricar a pedido, motorreductores con 6 o 7 etapas

				Modelo	Modelo
MR - Eje - VEL - Motor				MR105-VEL	MR107-VEL
Servicio				Normal	
Potencia [Hp]				0,0309	0,0710
Tensión nominal [VCC]				24	
Io (Intensidad en vacío). Inom (nominal). Is (arranque /bloqueo) [A]				0,5 . 1,5 . 6,5	0,4 . 2,79 . 10,9
RPM Nom . RPM Vacío				7810 . 9100	9100 . 10300
Peso . Adicional por etapa [Kg]				0,270 . 0,010	0,480 . 0,06
Etapas	Desmult	Engran.	VELocidad [RPM]	Cupla [Kgf.cm]	
0	1:1	0	6400	0,284	0,565
1	4:1	4	1600	1,13	2,26
1	6:1	6	1064	1,70	3,39
2	16:1	44	400	4,54	9,04
2	24:1	64	266	6,80	13,56
2	36:1	66	177	10,21	20,34
3	64:1	444	100	18,14	36,16
3	96:1	644	66	27,22	54,24
3	144:1	664	44	40,82	81,36
3	216:1	666	30	61,24	100,00
4	256:1	4444	25	72,58	"
4	384:1	6444	17	100,00	"
4	576:1	6644	11	"	"
4	864:1	6664	7,5	"	"
5	1024:1	44444	6,0	"	"
5	1536:1	64444	4,0	"	"
5	2304:1	66444	2,7	"	"
5	3456:1	66644	1,8	"	"
5	5184:1	66664	1,2	"	"
5	7776:1	66666	0,8	"	"

La empresa se reserva el derecho de modificar los datos técnicos sin previo aviso.
 Las velocidades de la modificación son convencionales.

Anexo 2 - Planos





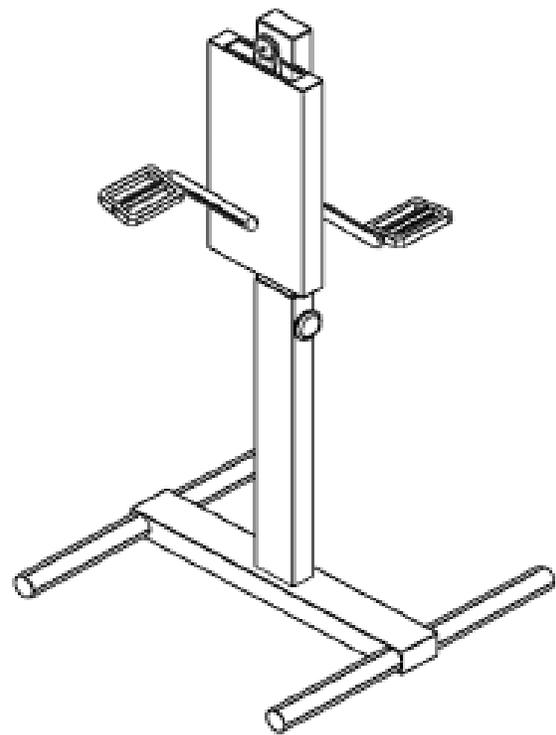
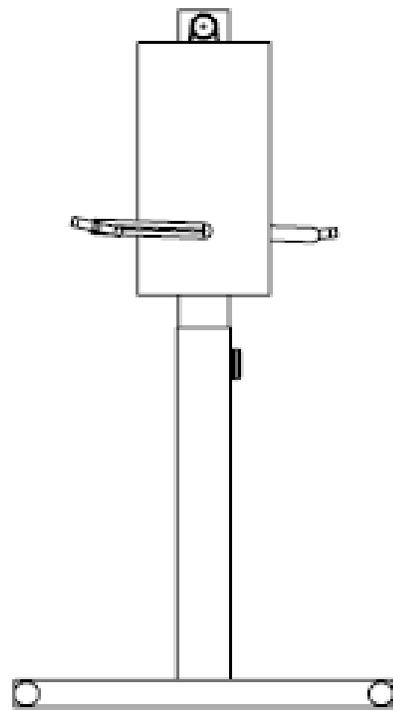
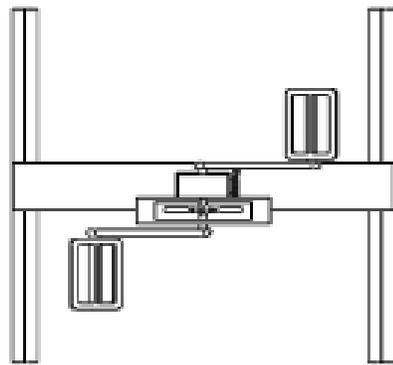
TÍTULO: MAQUINA DE RECUPERACION
EXTREMIDADES SUPERIORES

AUTOR: JOSE APARICIO

A4

ESCALA: 1:20

HOJA 1 DE 1



OBJETO: MAQUINA DE RECUPERACION
EXTREMIDADES SUPERIORES

AUTOR: JOSE APARICIO

A4

RECALCULO

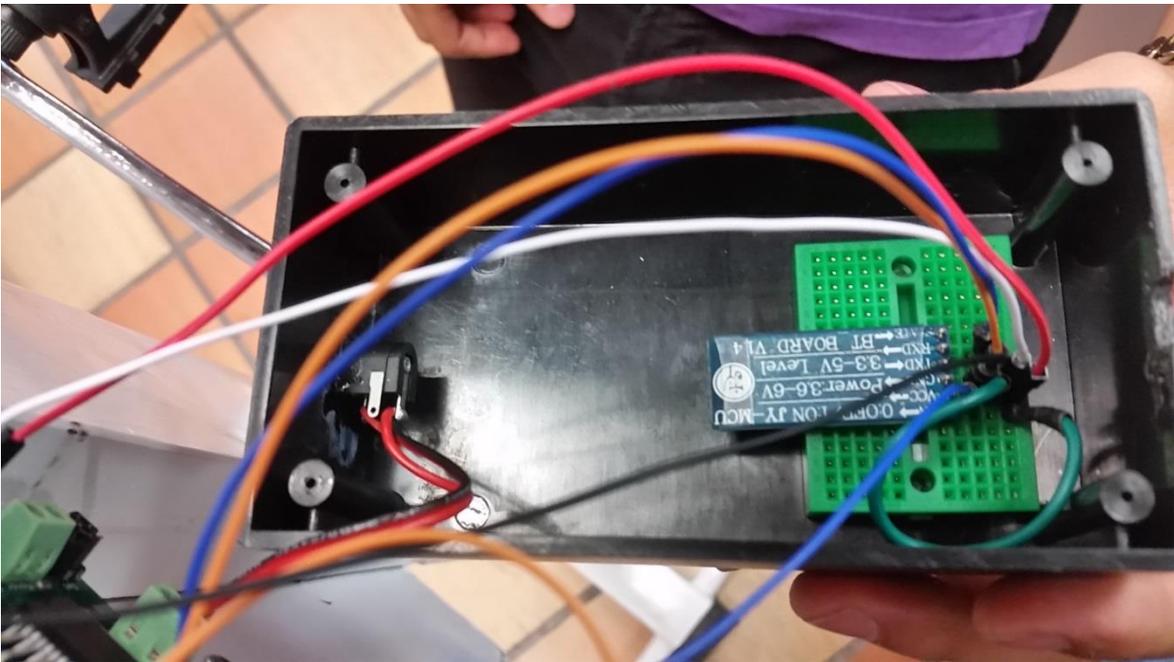
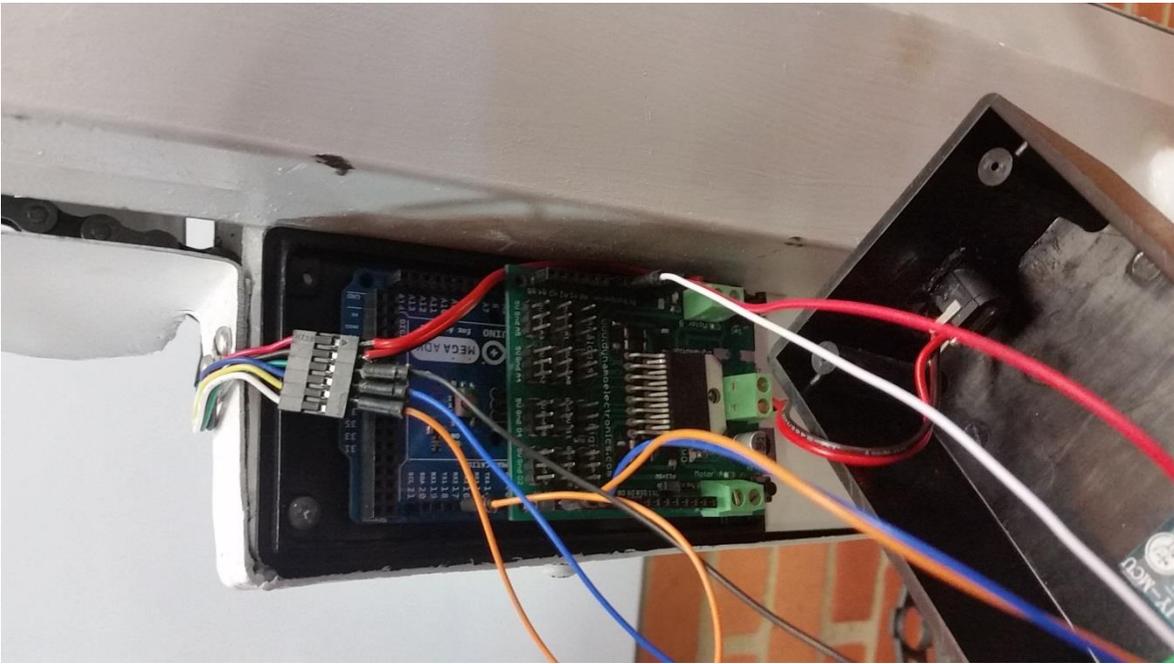
HOJA 1 DE 1

Anexo 3 – Fotos Prototipo









Anexo 4 – Código Arduino

```
char RES='A';
int contador=0;
float SEP=0;
float pwm=0;
float U=0;
float U_1=0;
float E=0;
float E_1=0;
float PV=0;
float PV_1=0;
float PV_2=0;
float PVF=0;
float PVF_1=0;
float PVF_2=0;

void setup() {
  pinMode(3,OUTPUT);
  pinMode(5,OUTPUT);
  attachInterrupt(5, blink, RISING); //interrupcion por flanco de subida
  Serial.begin(9600); // opens serial port, sets data rate to 9600 bps
}

void loop() {
  RES='A';
  SEP=0;
  contador=0;
  SEP=0;
  pwm=0;
  U=0;
  U_1=0;
  E=0;
  E_1=0;
  PV=0;
  PV_1=0;
  PV_2=0;
  PVF=0;
  PVF_1=0;
  PVF_2=0;

  //1
  while (SEP == 0) {

    SEP = Serial.parseInt();
  }
}
```

```

//1

// DENTRO DE ESTE ESPACIO DEBE IR EL CONTROLADOR
while(RES=='A') {

    // INICIO CONTROLADOR PID
    contador=0;
    delay(50);
    PV=contador*18;
    PV=PV/89;

//FILTRO
    PVF=0.0134*PV+0.0267*PV_1+0.0134*PV_2+1.6475*PVF_1-0.7009*PVF_2;
    PV_1=PV;
    PV_2=PV_1;
    PVF_1=PVF;
    PVF_2=PVF_1;
//FIN FILTRO

//CALCULO ERROR
    E=SEP-PVF;
    U=U_1+2.1565*E-(2.1565*0.89*E_1); //ecuacion PI

// Saturador Accion de Control
    if(U>100){
        pwm=255;
    }else if(U<0)
    {
        pwm=0;
    }else {
        pwm=U*255;
        pwm=pwm/100;
    }
//Fin Saturador

// Escritura acción de control en salida de pwm
    analogWrite(3,0);
    analogWrite(5,(int)pwm);
//Fin escritura acción de control

// Accion de control y errores pasados
    U_1=pwm*100;

```

```
U_1=U_1/255;
E_1=E;
//Fin valores pasados

//FIN CONTROLADOR

    Serial.println(PVF);

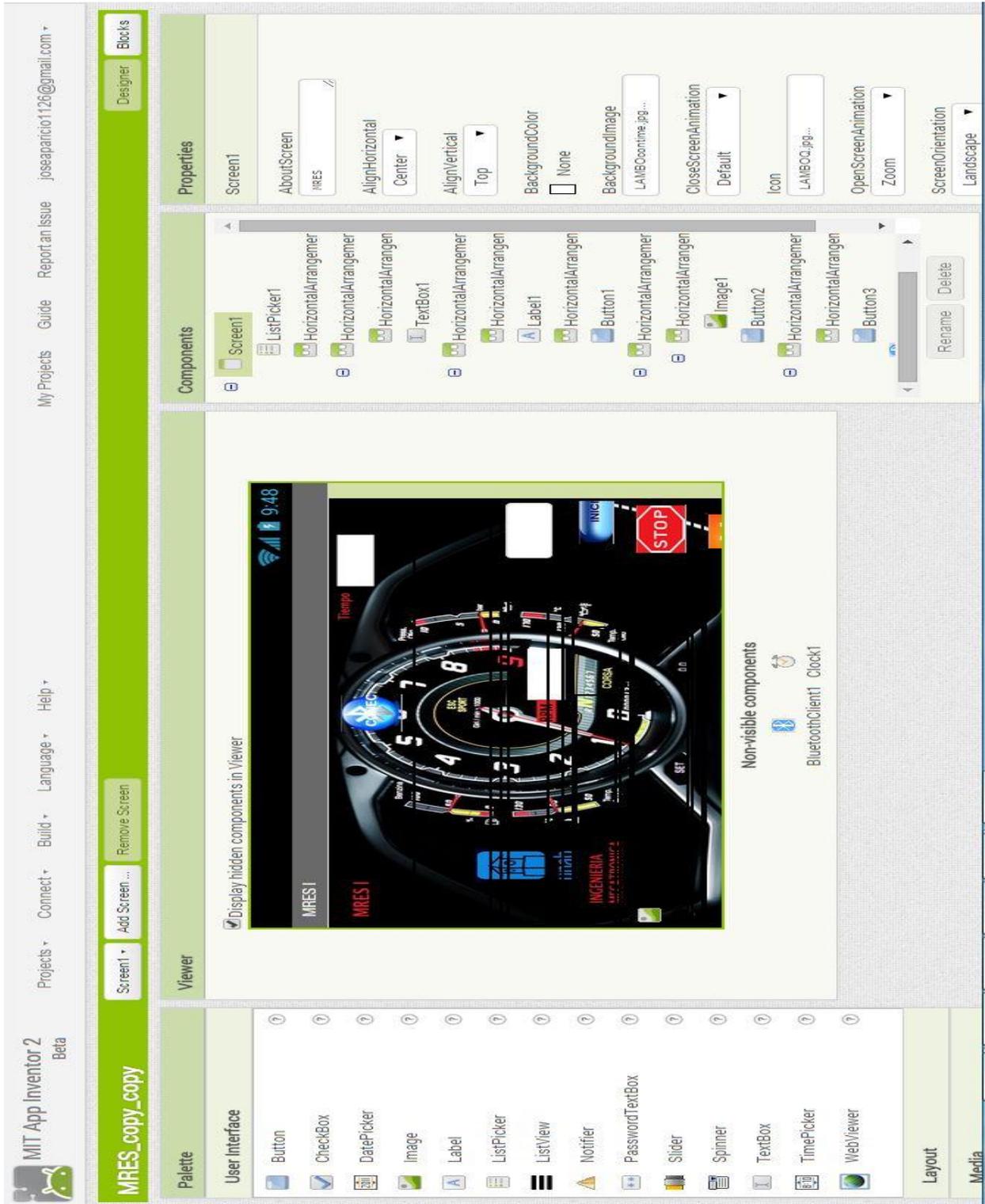
    if(Serial.read()=='C'){
        RES='C';
    }
} // FIN ESPACIO CONTROLADOR

analogWrite(3,0);
analogWrite(5,0);

}

void blink()//funcion de interrupcion
{
    contador=contador+1;
}
```

Anexo 5 - Pantalla Interfaz en celular Android



MRES I

