

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

Exoesqueleto Robótico de Miembro Superior para la Asistencia de Carga y Prevención de Lesiones Musculo-esqueléticas en Trabajadores de Construcción Civil

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Mecatrónico**, que presenta el bachiller:

Arturo Mendoza Quispe

ASESOR: Francisco Fabián Cuéllar Córdova

Lima, agosto del 2014

Resumen

El desarrollo de varias tecnologías ha permitido que hoy en día los exoesqueletos robóticos sean una realidad, siendo actualmente usados en distintas áreas de trabajo; sin embargo, éstos aún presentan ciertas limitaciones, como por ejemplo, restringir el desplazamiento del usuario si éstos están fijos a soportes.

Por otro lado, el tipo de trabajo que realiza el trabajador de construcción civil, como la carga y transporte de elementos de construcción, lo pone en una situación de predisposición a sufrir lesiones como fracturas, esguinces y diversos trastornos músculo-esqueléticos.

El presente proyecto consiste en el diseño de un exoesqueleto de miembro superior que alivie el esfuerzo en el transporte de carga y disminuya los riesgos a la salud de los trabajadores de construcción civil. Se presenta una solución de un exoesqueleto pasivo que utiliza el mecanismo kickstart ratchet –mecanismo que permite el movimiento rotacional en tan sólo un sentido y que utiliza los dientes de engrane en las caras planas de los discos en contacto para distribuir el torque entre todos los dientes de la pieza-, para poder soportar la carga aplicada por largos períodos de tiempo sin la necesidad de un suministro eléctrico permanente.

Este diseño es ergonómico y permite un uso continuo y prolongado, es seguro para el usuario, compacto y fácil de transportar, es autónomo y no limita del desplazamiento del usuario. Así mismo, previene lesiones musculoesqueléticas a través de la corrección de la postura del usuario, distribuyendo la carga uniformemente en la posición óptima. Además, resulta en una alternativa más económica que el costo que implica una lesión músculo-esquelética debido a las horas-hombre perdidas, gasto en medicamentos, tiempo invertido en fisioterapia, hasta inclusive posibles demandas a la empresa responsable.

Finalmente, se espera que gracias al uso del exoesqueleto robótico, el trabajador de construcción civil pueda aumentar su eficiencia laboral al ser capaz de cargar y transportar un mayor número de elementos en un mismo período de tiempo que si no contara con el exoesqueleto, puesto que presentaría menos cansancio.

TRABAJO DE FIN DE CARRERA PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO

Título : Exoesqueleto Robótico de Miembro Superior para la Asistencia de Carga y Prevención de Lesiones Musculo-esqueléticas en Trabajadores de Construcción Civil

Asesor : Francisco Fabián Cuéllar Córdova

Alumno : Arturo Mendoza Quispe

Código : 20094311

Tema N° : 1

Fecha : 06 Agosto 2013



Descripción y Objetivos

El presente proyecto consiste en el diseño de un exoesqueleto de miembro superior que alivie el esfuerzo en el transporte de carga y disminuya los riesgos a la salud de los trabajadores de construcción civil. Se presenta una solución que consiste en un exoesqueleto pasivo que utiliza el mecanismo kickstart ratchet –mecanismo que permite el movimiento rotacional en tan sólo un sentido y que utiliza los dientes de engrane en las caras planas de los discos en contacto para distribuir el torque entre todos los dientes de la pieza-, de modo que pueda soportar la carga aplicada por largos períodos de tiempo sin necesitar constantemente de suministro eléctrico. Para ello, se hizo un análisis de la problemática particular para el trabajador de construcción civil en la tarea de cargar y transportar bolsas de cemento, arena fina, arena gruesa, etc., observándose que se encuentran constantemente expuestos a una gran variedad de riesgos para la salud, resultados de movimientos forzados repetitivos, posturas inadecuadas o esfuerzos violentos. Este diseño es ergonómico y permite el uso continuo y prolongado, es seguro para el usuario, compacto y fácil de transportar, es autónomo y no limita del desplazamiento del usuario. Así mismo, previene lesiones musculo-esqueléticas a través de la corrección de la postura del usuario, distribuyendo la carga uniformemente en la posición óptima.

Máximo: 100 páginas



FRANCISCO CUELLAR



Contenido

Capítulo 1: Presentación de la Problemática	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Análisis de la problemática	2
Capítulo 2: Requerimientos del sistema mecatrónico y presentación del concepto.....	3
2.1. Requerimientos del sistema mecatrónico	3
2.2. Concepto de solución	4
Capítulo 3: Sistema Mecatrónico	7
3.3. Diagrama de funcionamiento del sistema mecatrónico.....	7
3.4. Sensores y actuadores.....	7
3.4.1. Resortes para mecanismo ratchet.....	7
3.4.2. Motores, encoders y controladores de motores para acople de mecanismo	8
3.4.3. Sensores de fuerza.....	10
3.4.4. Microcontrolador	11
3.4.5. Batería	12
3.5. Planos del sistema mecatrónico	13
3.6. Diagramas esquemáticos de los circuitos del sistema mecatrónico.....	19
3.6.1. Circuito de Arduino	19
3.6.2. Circuito de fuente de batería	20
3.6.3. Circuito de sensores	21
3.6.4. Circuito de led y pulsadores.....	21
3.6.5. Circuito de encoder y controlador de motores.....	22
3.7. Diagrama de flujo del programa de control.....	22
Capítulo 4: Presupuesto	25
Capítulo 5: Conclusiones	27
5.1. Recomendaciones.....	27
Bibliografía.....	28
Anexo 1: Encuesta.....	31
Anexo 2: Análisis de concentración esfuerzos en el cuerpo humano y soluciones propuestas.....	32
Anexo 3: Antropometría y ergonomía	34
Anexo 4: Obtención de sollicitaciones mecánicas y electrónicas	37
A4.1. DCL en miembro superior	37
A4.2. DCL en articulaciones	38
A4.3. Análisis de mecanismo de tuerca husillo.....	39

A4.4. Análisis de requerimientos electrónicos	41
Anexo 5: Cálculos para selección de sensores y actuadores.....	42
A5.1. Selección de resortes.....	42
A5.2. Selección de motores.....	42
A5.3. Selección de los sensores de fuerza	44
A5.4. Selección de batería	45
Anexo 6: Análisis de esfuerzos	47
A6.1. Análisis de antebrazo.....	47
A6.2. Análisis de brazo.....	48
A6.3. Análisis de espalda	49
A6.4. Análisis de soporte de piernas	51
A6.5. Análisis de ratchet rotatoria.....	52
A6.6. Análisis de ratchet deslizante	53
Anexo 7: Cotizaciones	54
A7.1. Elementos mecánicos	54
A7.2. Elementos electrónicos	57
A7.3. Elementos adicionales	59
Anexo 8: Usabilidad y portabilidad.....	62
Anexo 9: Hojas de Datos	63
Anexo 10: Planos de despiece y ensamble.....	67

Capítulo 1: Presentación de la Problemática

1.1. Introducción

El rápido desarrollo de exoesqueletos robóticos de los últimos años se ha debido en gran parte a las grandes mejoras en las tecnologías aplicadas en robótica y en mecatrónica: nuevos tipos de motores, las mejoradas cualidades y capacidades de los microprocesadores, la electrónica de potencia usada en el control de motores en dispositivos ultra compactos, sistemas micro electromecánicos, entre otros. De esta forma, el desarrollo de varias tecnologías que no estaban disponibles hace una década, han hecho que los exoesqueletos sean una posibilidad hoy en día.

Así, debido a la gran variedad de exoesqueletos robóticos, éstos suelen clasificarse [1] según:

1. Diseño mecánico: exoesqueletos activos y exoesqueletos pasivos.
2. Parte del cuerpo que atañe: miembro superior, miembro inferior y otros.
3. Número de GDL que posee: la mayoría tiene menos de 7.
4. Aplicación del exoesqueleto: robots para rehabilitación, robots asistenciales, robots amplificadores de habilidades humanas o de uso combinado.

Como vemos, en la actualidad se están construyendo exoesqueletos [2] [3] con capacidades para distintas áreas. Así, se ha logrado el desarrollo de exoesqueletos de miembro inferior que permiten al usuario cargar hasta 90kg sin impedir movimiento alguno ni causar sobre-esfuerzo físico, en otras palabras proveen aumento de la fuerza y aumento de resistencia física (EksoHiker™, ExoClimber™, HULC™) [4]. Se han desarrollado otros que se caracterizan por ser extremadamente compactos, ligeros y modulares [5] sin perder funcionalidad.

Con respecto a los exoesqueletos de miembro superior, la mayoría se enfocan en alcanzar la mayor cantidad posible del espacio de trabajo natural del brazo humano (EXO-UL7) [6] [7]. Algunos otros esfuerzos se vierten en la realización de exoesqueletos adaptables al usuario, teniendo en cuenta su seguridad [8], comodidad [9] y ergonomía en el espacio de trabajo [10]. También, existen diseños innovadores [10] [11] [12] que abordan retos particulares al diseño mecánico y la complejidad de movimientos que el cuerpo humano posee [13], como por ejemplo, el movimiento del hombro, el cual no tiene un centro de rotación fijo. Entre los exoesqueletos, los usos más comunes son de rehabilitación motora [14] [15] [16] (varios ya están siendo comercializados); y de asistencia laboral.

1.2. Análisis de la problemática

Tal como se vio, los exoesqueletos son desarrollados con distintos propósitos y usos (rehabilitación motora, de asistencia en el trabajo, etc.); y evidentemente, cada ámbito presenta retos propios a las características de su uso. Es por ello que es necesario analizar la problemática particular para el trabajador de construcción civil en la tarea de cargar y transportar cargas que puedan afectar al operario, tales como bolsas de cemento, arena fina, arena gruesa, etc.

En primer lugar, los trabajadores de construcción civil se encuentran constantemente expuestos a una gran variedad de riesgos para la salud [17] (físicos, químicos, biológicos y sociales), teniendo entre las lesiones más comunes a fracturas, esguinces y diversos trastornos músculo-esqueléticos (tendinitis, bursitis, lumbalgias, dorsalgias, cervicalgias, síndrome de hombro doloroso, etc.), resultados de lesiones traumáticas, movimientos forzados repetitivos, posturas inadecuadas o esfuerzos violentos.

Dichas aseveraciones fueron corroboradas en nuestro medio local al haber observado in situ las condiciones de trabajo de los obreros de construcción civil de una instalación (ver Anexo 1: Encuesta). De ello, se verificaron la presencia de problemas músculo-esqueléticos provocados principalmente por la mala postura de carga y por la magnitud de esfuerzo al cual están sometidas las diversas partes del cuerpo involucradas. Dichos problemas tendrán que ser abordados en el planteamiento de una solución.

En segundo lugar, los exoesqueletos robóticos actuales aún presentan ciertas limitaciones, un ejemplo de ello es que la mayoría de exoesqueletos de miembro superior limitan el desplazamiento del usuario. Algunos están fijados a soportes, paredes o techos (que contienen la mayoría de actuadores y alivian la carga al usuario), otros necesitan de tomas de aire (funcionamiento neumático) limitando el radio de acción del usuario, y finalmente, los que están fijos a sillas de ruedas (movilidad escasa).

Capítulo 2: Requerimientos del sistema mecatrónico y presentación del concepto

2.1. Requerimientos del sistema mecatrónico

Los requerimientos de este proyecto son una combinación de requerimientos mecánicos (principalmente de resistencia mecánica), requerimientos electrónicos (autonomía) y requerimientos físicos (protección al usuario).

En primer lugar, el proyecto tendrá que dar solución a los problemas identificados en la sección anterior. Precisamente, el exoesqueleto garantizará la correcta postura en la carga de bolsas de cemento así como en el alivio de esfuerzos en zonas específicas de los miembros superiores e inferiores.

Luego, puesto que es un exoesqueleto robótico, deberá:

- Contar con los GDL suficientes que garanticen la movilidad del miembro superior en el espacio de trabajo necesario -entiéndase movilidad de hombro y codo en el plano sagital.
- Ser un sistema capaz de soportar los esfuerzos inducidos por la carga a levantar: una bolsa de cemento de 42.5 kg, sin añadir más peso del necesario.

Es decir, el diseño contemplará el correcto dimensionamiento de las piezas así como la correcta selección de materiales.

Además, la utilización de este exoesqueleto robótico requiere grandes desplazamientos, por lo cual debe ser completamente autónomo. Ello implica que debe ser eficiente en el uso de la energía eléctrica; y que no estará fijado a ningún tipo de soporte estacionario, ni que dependa de tomas de aire o similares. En otras palabras, debe ser independiente de tomas de corriente durante los períodos de tiempo que permitan su uso continuado.

Puesto que durante el uso se plantea que el usuario se desplace libremente, el exoesqueleto robótico deberá permitir la completa movilidad en los miembros inferiores y estar adecuadamente soportado en el usuario de modo que la carga se distribuya de la mejor manera posible sin causar lesiones a corto o a largo plazo y que permitan un uso prolongado y continuo del exoesqueleto.

Finalmente, por motivos de seguridad, deberá contar con sistemas eléctricos que impidan el uso del exoesqueleto en caso exista la posibilidad de causar daño al usuario

2.2. Concepto de solución

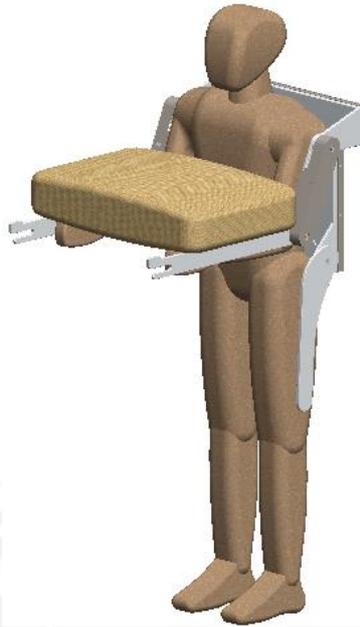


Figura 1: Vista general del sistema mecatrónico

Para este proyecto, se plantea el desarrollo de un exoesqueleto pasivo de 2 GDL para la asistencia de carga y prevención de lesiones.

El diseño del exoesqueleto robótico está basado en el mecanismo de una ratchet, el cual consiste en permitir el movimiento rotacional en tan sólo un sentido. El tipo de ratchet implementado es conocido como kickstart ratchet y cuenta con la particularidad de utilizar los dientes de engrane en las caras planas de los discos en contacto, ello permite distribuir el torque uniformemente entre todos los dientes de la pieza.



Figura 2: Kickstart Ratchet de una moto Honda XR650R

El motivo de este diseño es utilizar un mecanismo que pueda soportar la carga aplicada sin necesitar constantemente de motores u otros componentes eléctricos. El sistema propuesto en este proyecto permite, además, acoplar o desacoplar el mecanismo de la ratchet; ello se logra desplazando el resorte lineal ubicado en un extremo.

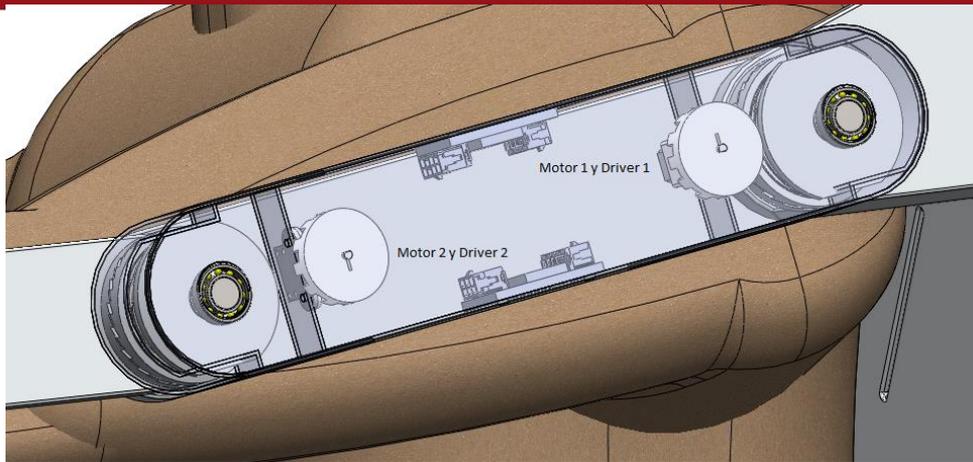


Figura 3: Detalle de la ubicación de los módulos de control de motores ubicados en el brazo y del mecanismo de acople y desacople

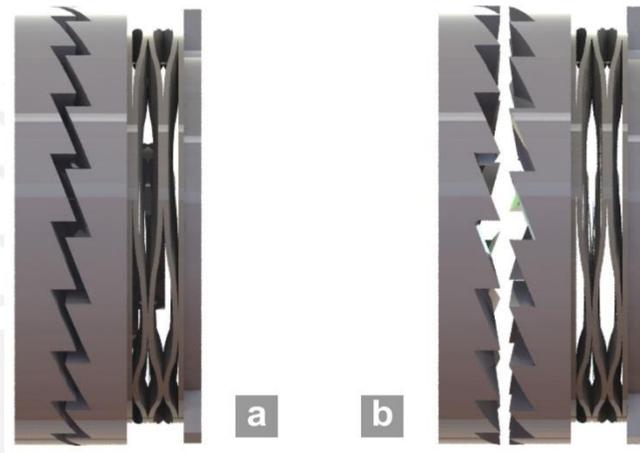


Figura 4: Comparación entre mecanismo acoplado (a) y desacoplado (b) desplazando el resorte

Cuando el mecanismo se encuentra desacoplado permite el movimiento libre en ambas direcciones, en otras palabras, movilidad total al usuario. Al contrario, cuando se encuentra acoplado sólo permite el movimiento en una dirección. Estos mecanismos se encontrarán ubicados en cada una de las articulaciones del exoesqueleto correspondientes al miembro superior; de esta forma, cuando se encuentren acoplados, únicamente permitirán al usuario la flexión del brazo, más no la extensión del mismo.

Una parte importante de este proyecto es corregir la postura de carga, así como minimizar los riesgos al usuario; por ello, el exoesqueleto incluye un par de soportes a las piernas que sirven para transmitir la carga hasta los miembros inferiores (ver Anexo 2: Análisis de concentración esfuerzos en el cuerpo humano y soluciones propuestas). Además, el exoesqueleto robótico está diseñado para ser lo más ergonómico (ver Anexo 3: Antropometría y ergonomía) y ligero posible: el exoesqueleto robótico agrega 6 kg de carga al usuario.

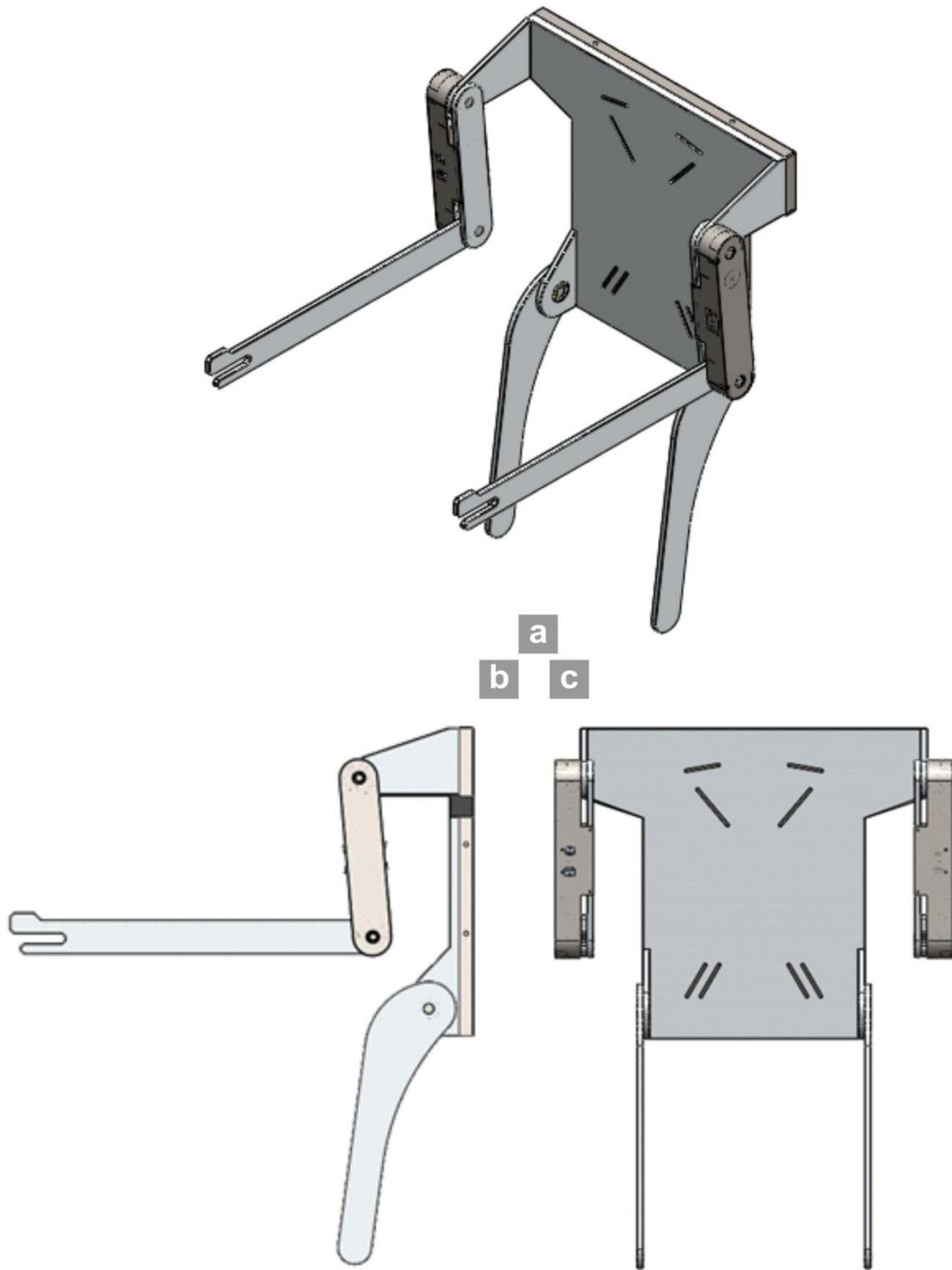


Figura 5: Propuesta mecatrónica (a) vista isométrica (b) vista derecha (c) vista frontal

Capítulo 3: Sistema Mecatrónico

3.3. Diagrama de funcionamiento del sistema mecatrónico

El exoesqueleto mecatrónico resalta por su simplicidad de planteamiento, así:

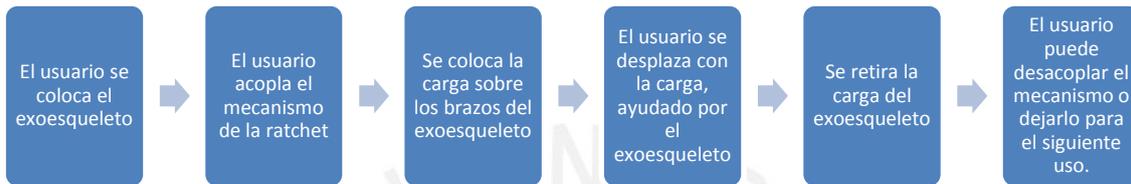


Figura 6: Diagrama de funcionamiento del sistema mecatrónico

De esta forma, se logra un sistema que sólo consume energía durante el tiempo que acopla y desacopla el mecanismo; en otras palabras, mientras lleva la carga el consumo de energía es prácticamente nulo.

La colocación del exoesqueleto es un proceso en varias etapas pues cuenta con varios aditamentos que aseguran una experiencia cómoda y además segura (ver Anexo 8: Usabilidad y portabilidad).

3.4. Sensores y actuadores

A continuación se detallarán los sensores y actuadores utilizados en este proyecto, su funcionamiento y ubicación dentro del sistema. Los cálculos que justifican la elección de estos componentes, así como los de diagramas de cuerpo libre y circuitos, se encuentran en el Anexo 5: Cálculos para selección de sensores y actuadores.

3.4.1. Resortes para mecanismo ratchet

Los resortes utilizados en el sistema ratchet son los **CMS45-L1** de Smalley Steel Ring Co., que cuentan con diámetro exterior 45mm, diámetro interior 35mm, constante de resorte 114.94N/mm.



Figura 7: Detalle de resorte crest-to-crest shim ends CMS45-L1

Los resortes irán unidos en un extremo a la ratchet deslizante y por el otro a la tapa (tuerca) cuya función es acoplar y desacoplar el sistema, en otras palabras irán en cada una de las articulaciones. Estos resortes permiten el funcionamiento del mecanismo de la ratchet. Así, cada vez que se realiza la rotación en la dirección permitida, la ratchet deslizante contrae el resorte, para que luego ésta pueda regresar a su posición inicial una vez la ratchet rotatoria haya girado lo suficiente.



Figura 8: Detalle de la ubicación de los resortes en el mecanismo de la ratchet

3.4.2. Motores, encoders y controladores de motores para acople de mecanismo

Los motores seleccionados son los **10:1 Micro Metal Gearmotor HP** de Pololu, se trata de un motor de 6V de 3000RPM, 120mA en free-run, 4oz-in (0.3kg-cm) y 1.6 A con rotor parado.



Figura 9: Detalle de motor 10:1 Micro Metal Gearmotor HP

Los motores serán encargados de realizar el movimiento rotatorio del husillo, el cual genera el desplazamiento lineal de la tuerca respectiva, la cual está conectada a la ratchet deslizante. Ello con la finalidad de acoplar o desacoplar el sistema ratchet al crear una distancia entre ratchets mayor a la profundidad de dientes, lo que implica que habrá un motor en cada articulación.

Se seleccionaron encoders en cuadratura con resolución de 48 cuentas por revolución. Una opción comercial que utiliza este tipo de encoders son los **Encoder for Pololu Wheel 42x19mm** de Pololu, los cuales estarán montados sobre los motores gracias al soporte **Pololu Micro Metal Gearmotor Bracket Extended Pair**. El motor contará con un acople que simulará las divisiones presentes en el Pololu Wheel 42x19mm de modo que el encoder tendrá la resolución de 48 cuentas por revolución, o lo que es, una resolución de 3 mm.



Figura 10: Tarjeta de encoder montada en soporte junto con motor

El controlador elegido es el controlador dual de Toshiba TB6612FNG, el cual consiste en dos puentes H (circuito que permite controlar un motor en ambos sentidos, avance y retroceso). Una opción comercial que utiliza este controlador es el **TB6612FNG Dual Motor Driver Carrier**, que puede controlar independientemente dos motores DC en ambos sentidos, con voltaje de 4.5-13.5V y corriente pico en cada canal de 3A. Para la selección de este controlador se tuvo en cuenta los requerimientos de corriente y voltaje de los motores, así como el tamaño y ubicación del mismo.



Figura 11: Detalle de tarjeta de controlador de motores

Se sabe que el motor a controlar necesita 6V y 1.6A para el arranque, requerimientos que se encuentran dentro de las capacidades del controlador. Si bien se pueden controlar dos motores desde un solo controlador, por cuestiones de ensamble se optó por utilizar uno solo por motor pues éstos se encontrarán ubicados junto a cada uno de los motores. Se decidió utilizar módulos de conexión intermedios para estos controladores de modo que se pueda ordenar el cableado de todo lo referente a encoder, controlador y motor y centralizarlo en una sola ubicación para su fácil ubicación en el sistema.

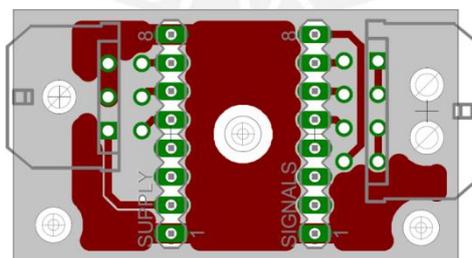


Figura 12: Módulo de conexión intermedio de motores que comprende las conexiones de controlador, encoder y motor

Cada uno de éstos módulos se encuentran ubicados junto a cada uno de los mecanismos de la ratchet, como se observa en la Figura 3.

3.4.3. Sensores de fuerza

Se eligieron los sensores de fuerza **Flexiforce A301**, los cuales tienen un rango de sensibilidad que puede llegar hasta 100lbs (440 N). Dichos sensores funcionan como resistencia de valor variable, para su uso se conectarán a modo de divisor de tensión con una resistencia de 2.2 K Ω con error de 1%.

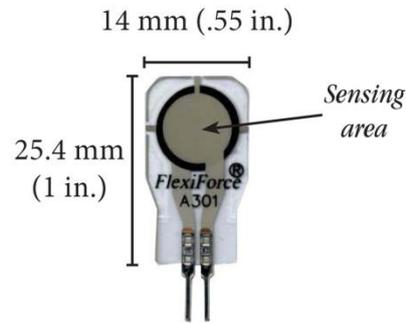


Figura 13: Detalle de sensor Flexiforce A301

La presencia de estos sensores es por dos motivos: en primer lugar, brindar seguridad al usuario, pues no se permitirá desacoplar el mecanismo de la ratchet si se detecta que la carga sigue sobre el brazo del usuario, evitando así que tenga que repentinamente soportar dicha carga. Y, el segundo motivo es con fines de investigación para evaluación de la mejor postura para la correcta distribución de la carga.

Los sensores se ubicarán sobre las caderas que se pondrán alrededor de los brazos y antebrazos respectivamente (ver Anexo 3: Antropometría y ergonomía).



Figura 14: Ubicación de sensores sobre codera

3.4.4. Microcontrolador

El microcontrolador seleccionado es el **Arduino Mega 2560 R3** (ATMEGA 2560). Para su elección se tomó en cuenta las necesidades del sistema tales como el número salidas para controlar los motores, el número de entradas para recibir las señales de los sensores, su conectividad con la computadora y los requerimientos electrónicos.

A continuación se especifican las conexiones del arduino:

- Conexiones de entrada digital:
 - 1 para señal de batería (A11)
 - 4 sensores de fuerza (A12, A13, A14, A15)
- Conexiones de entrada analógica:
 - 8 para 4 encoders (D2, D5, D6, D7, D9, D10, D11, D12)
 - 2 entradas para encendido de sistema y cambio de estado a modo de ahorro de energía (D20, D21)
- Conexiones de salida digital:
 - 1 diodo de alarma (D19)
 - 4 señales PWM para 4 motores (D3, D4, D8, D13)
 - 1 señal de activación para los controladores (D22)
 - 8 para control de dirección de 4 motores (D24, D26, D28, D30, D32, D34, D36, D38)



Figura 15: Detalle de tarjeta de Arduino Mega 2560 R3

Al igual que con los motores, se decidió utilizar un módulo de conexión intermedio para las conexiones con los pulsadores, controladores, motores, sensores, encoders y pulsadores.

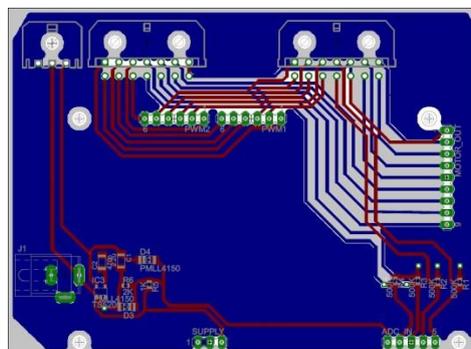


Figura 16: Módulo de conexión intermedio de Arduino que comprende las conexiones con los demás componentes

El microcontrolador irá ubicado en un compartimento en la espalda.

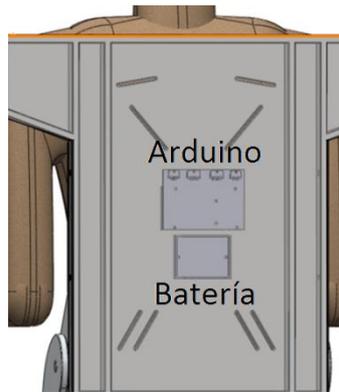


Figura 17: Ubicación del conjunto arduino y batería en la parte media de la espalda

3.4.5. Batería

Para la batería se propone utilizar 4 baterías **AA Alkaline Battery 1500 mAh**, las cuales irán montadas en un **Battery Holder - 4xAA to Barrel Jack Connector**. Dichas baterías son bastante comerciales en el medio, además, el usar baterías descartables nos libera de la necesidad de un cargador para el exoesqueleto robótico. Claramente, la batería es una parte fundamental del proyecto, puesto que el tiempo de vida de ésta determina el grado de portabilidad del exoesqueleto robótico y su funcionalidad en el campo. Según lo diseñado, el tiempo de vida de esta batería será de 3.42 h; además como se sabe que el tiempo de acople y desacople del mecanismo es de 3 s cada uno, podemos estimar que, en el peor caso, el exoesqueleto podrá ser usado 1000 veces, o según lo visto en Anexo 1: Encuesta, aproximadamente 2 meses y medio de trabajo antes de necesitar cambiarlas.



Figura 18: Ejemplo de batería de 1.5V AA



Figura 19: Soporte para baterías con conector para el módulo de conexión intermedio diseñado

La batería irá ubicada junto con el microcontrolador, en el compartimento de la espalda.

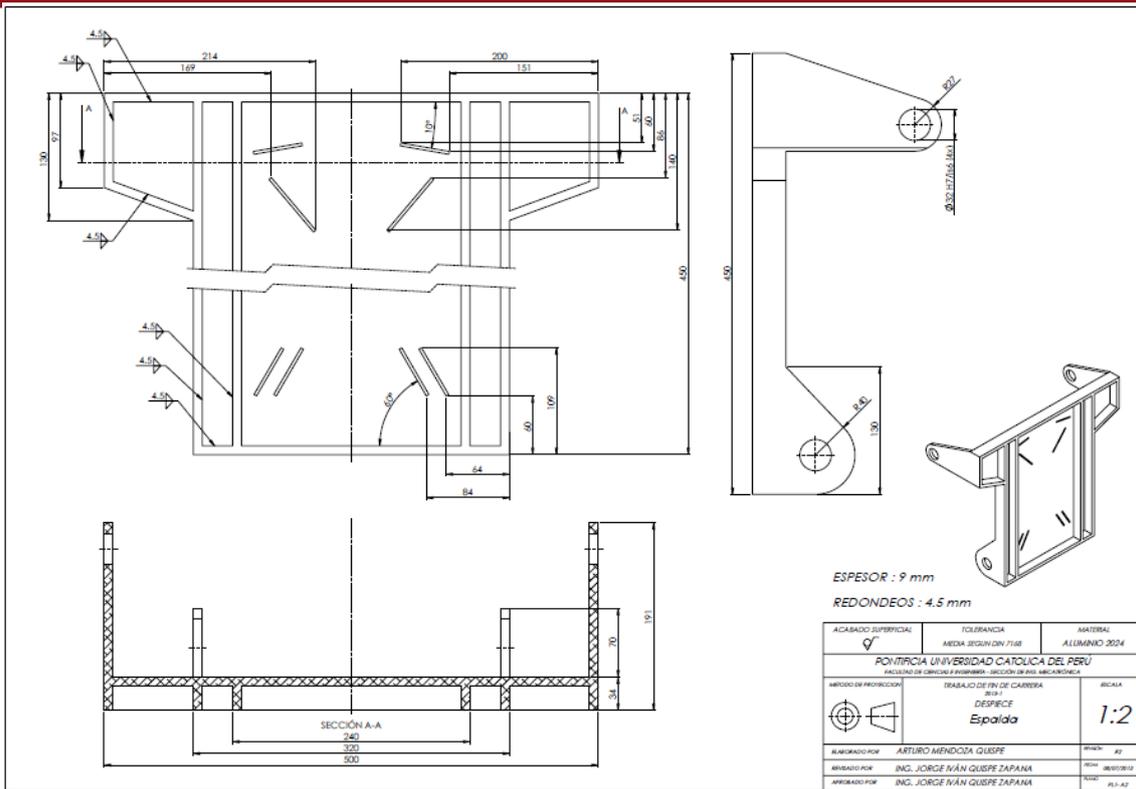


Figura 21: Plano de espalda

El brazo, es una pieza simple su diseño, sin embargo es capaz de soportar los esfuerzos inducidos por la fuerza y el par torsor.

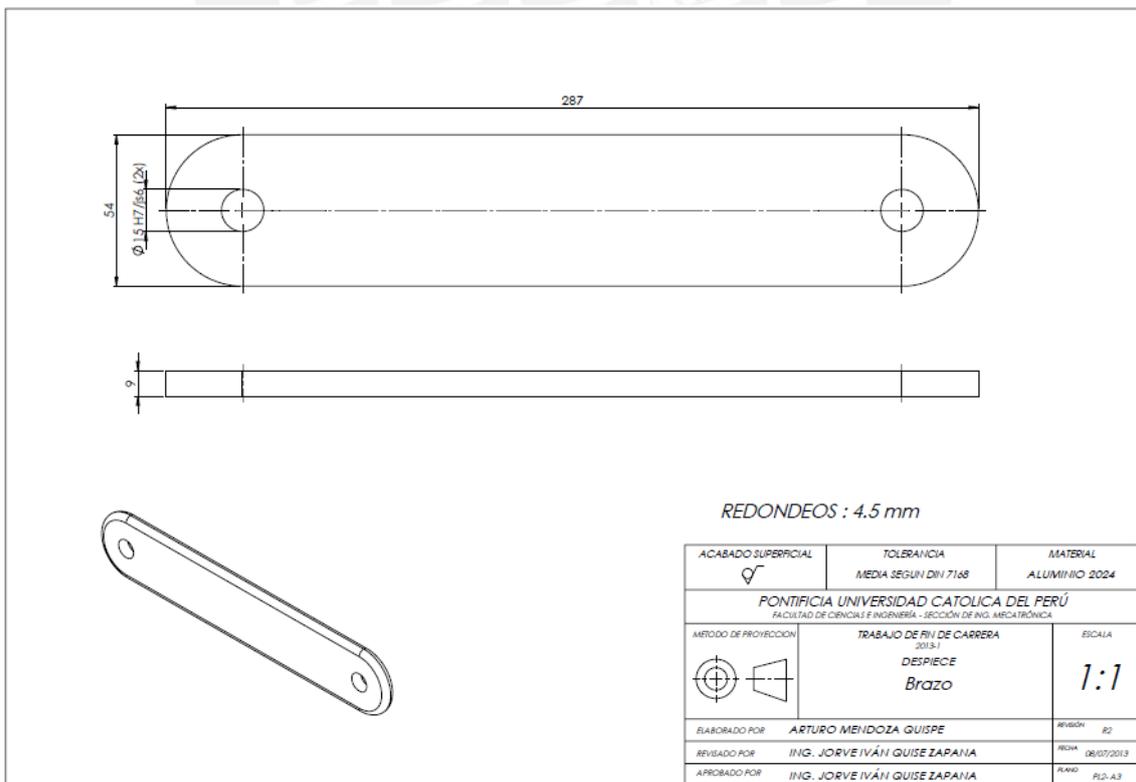


Figura 22: Plano de brazo

El antebrazo cuenta con un diseño particular en un extremo, ello es para darle una funcionalidad agregada de poder llevar pequeñas cargas adicionales colgándolas del soporte.

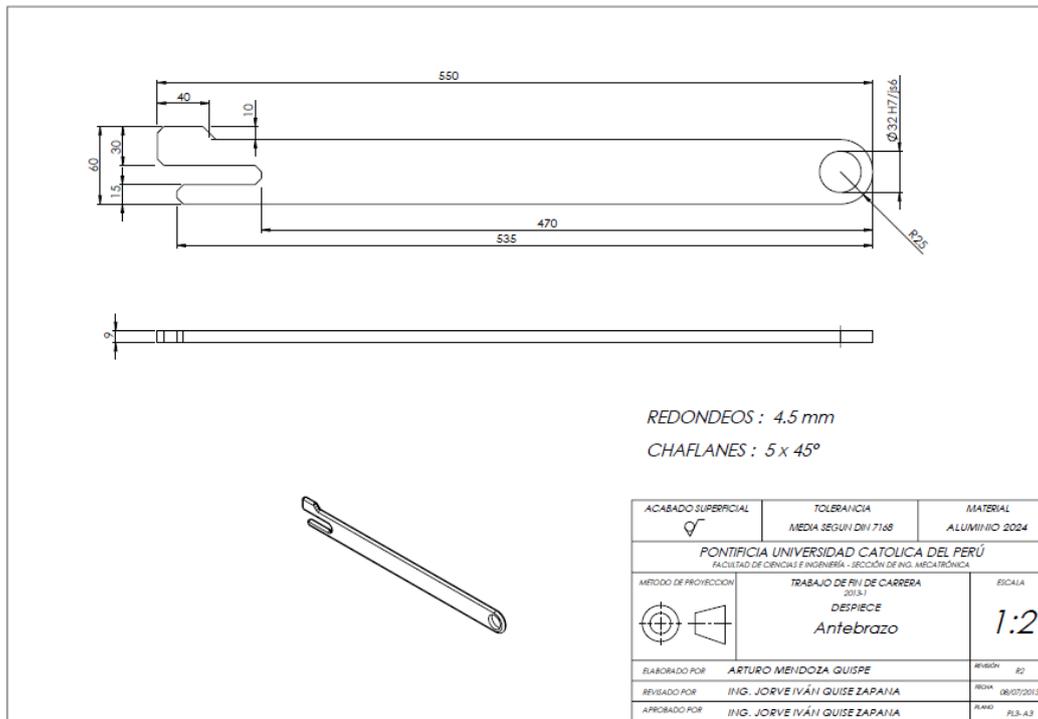


Figura 23: Plano de antebrazo

El diseño particular del miembro inferior responde a la necesidad de aliviar los tensores de esfuerzos que se generan por la ubicación del punto de aplicación de la carga y par de torsión.

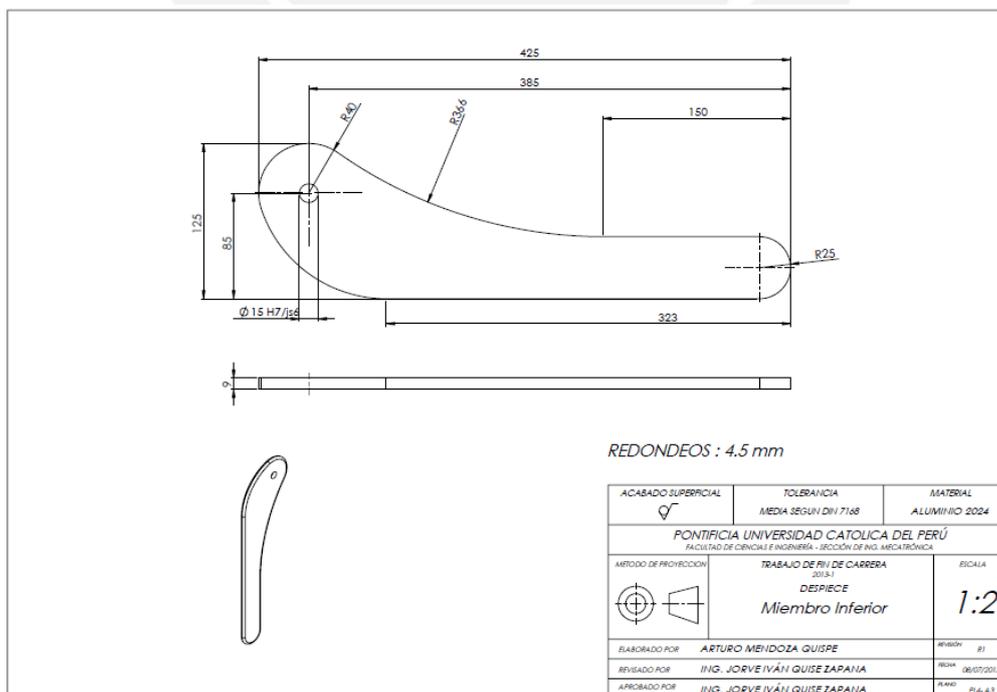


Figura 24: Plano de miembro inferior

La ratchet rotatoria y la ratchet deslizante son dos piezas cuyo diseño contempla el uso de tolerancias a fin de asegurar la correcta unión entre ellas y su adecuado funcionamiento en el sistema.

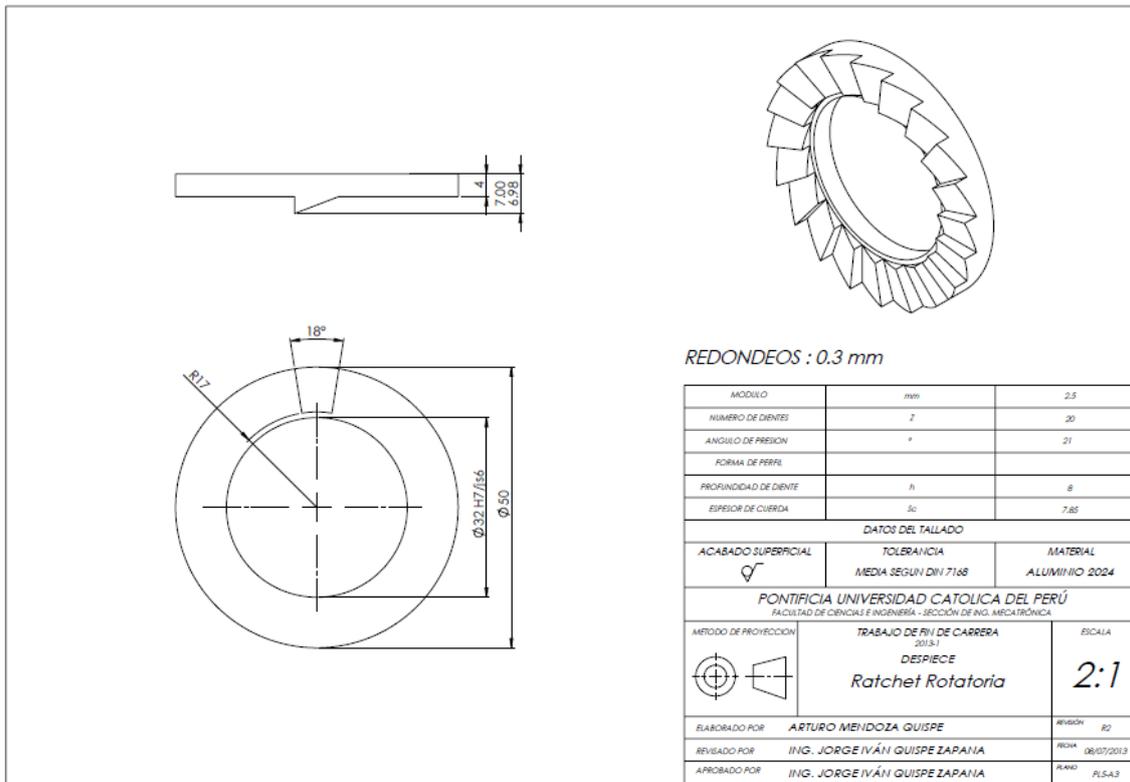


Figura 25: Plano de ratchet rotatoria

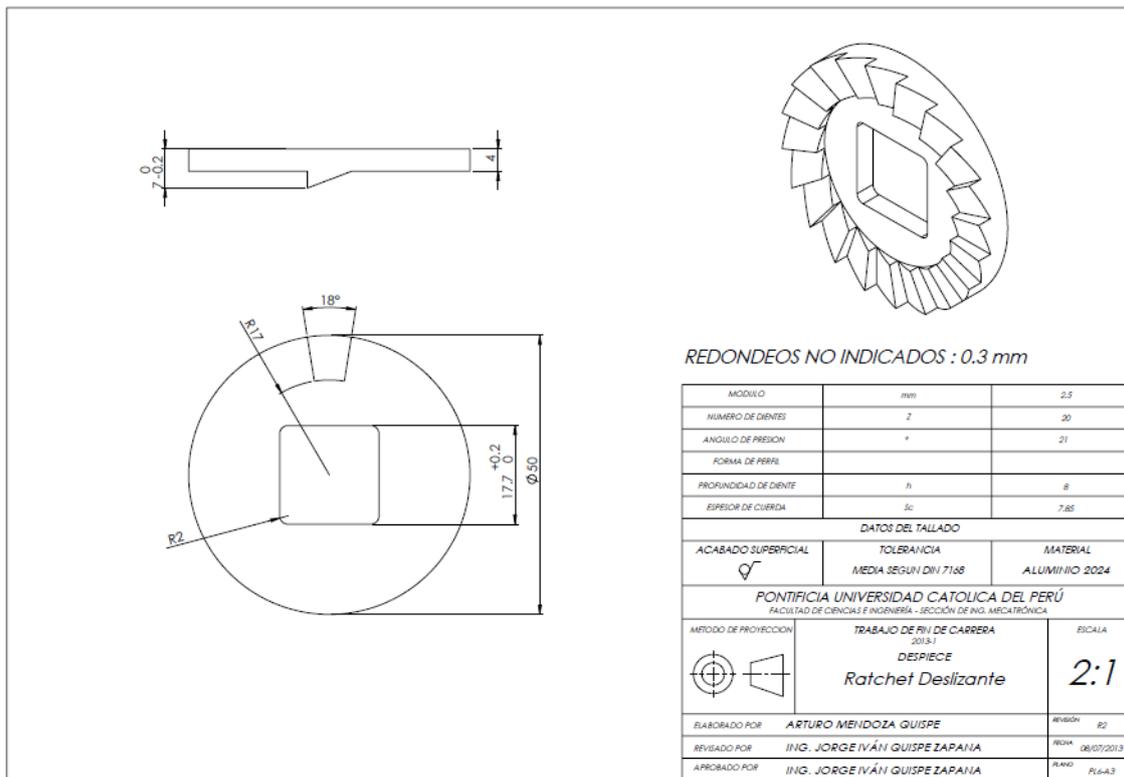


Figura 26: Plano de ratchet deslizante

El eje de ratchet es, en un extremo, un eje cuadrado, ello conlleva a que permite el desplazamiento axial pero imposibilita el movimiento angular (unión por forma). Además, el ajuste en la depresión es de juego, lo que le da la funcionalidad de un acople. Cabe mencionar que su diseño cumple lo estipulado en [18]

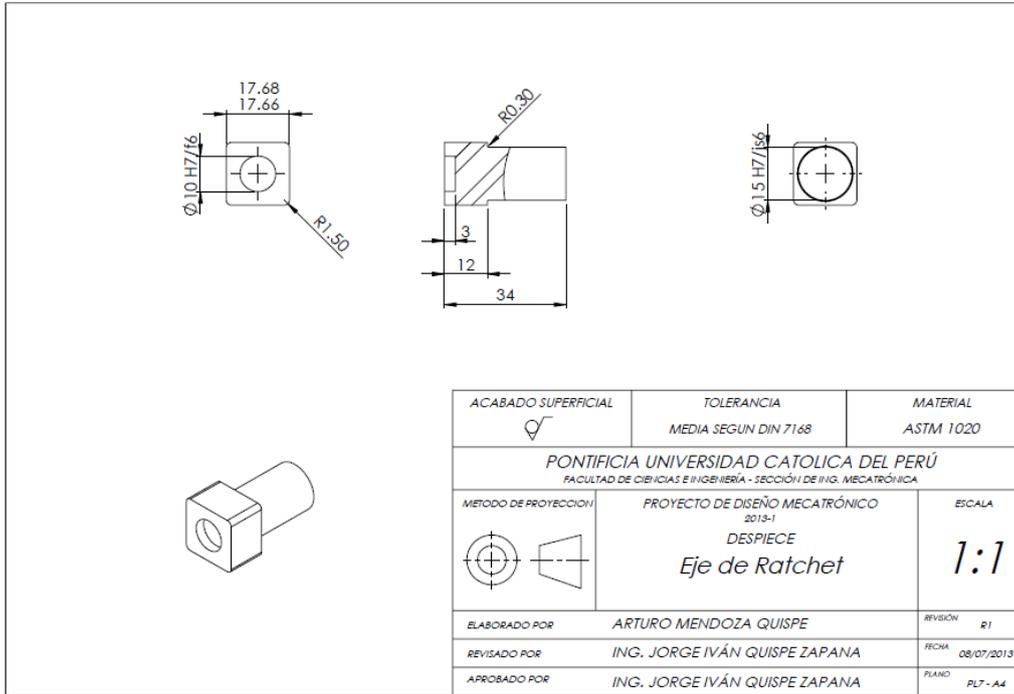


Figura 27: Plano de eje de ratchet

La tuerca husillo cumple la función de soportar la fuerza del resorte ante la compresión.

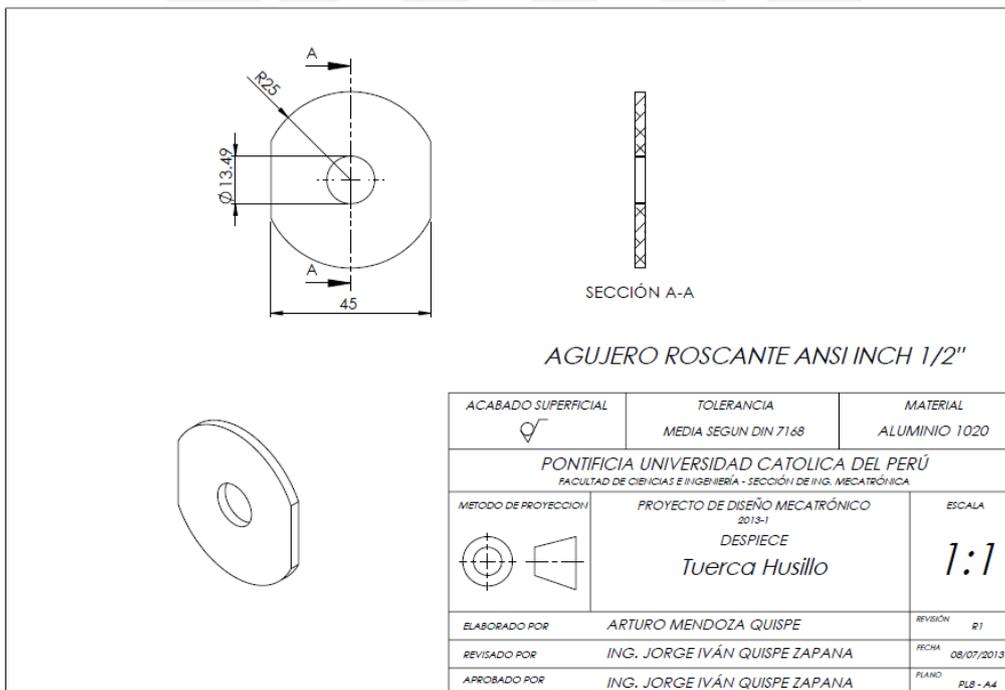


Figura 28: Plano de tuerca husillo

El husillo será comprado como un espárrago ansi 1/2", el cual será rebajado a las dimensiones deseadas.

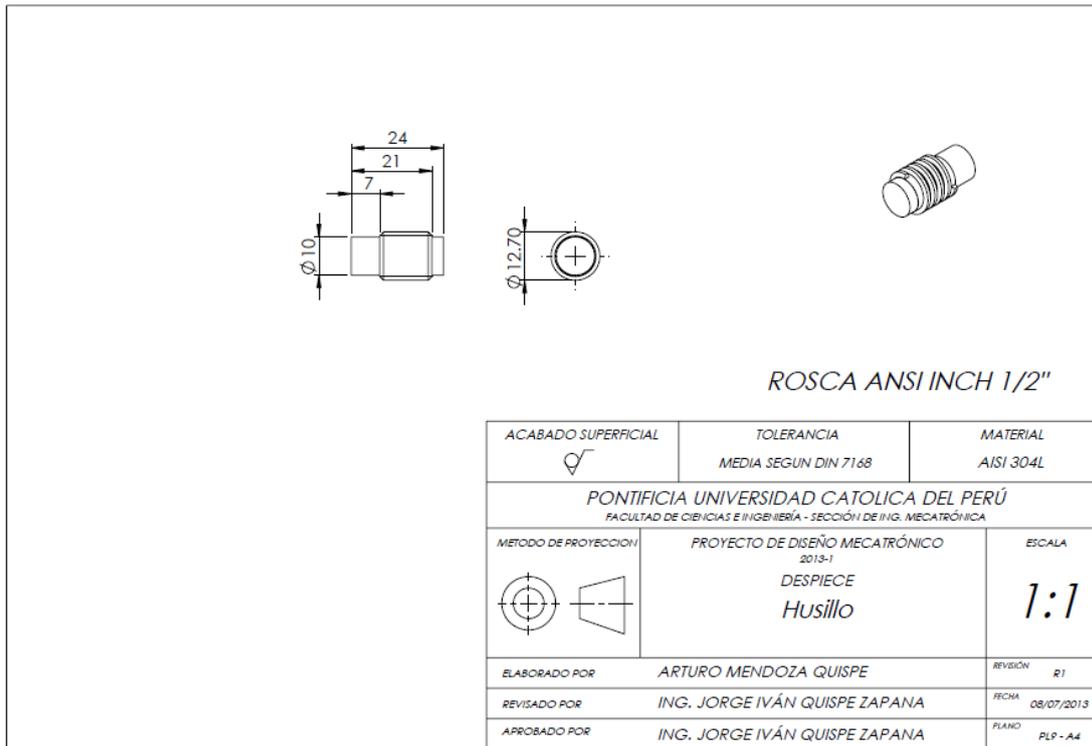


Figura 29: Plano de husillo

El eje de miembro inferior cumple la función de articular el miembro inferior y, por ende, brindar comodidad al usuario.

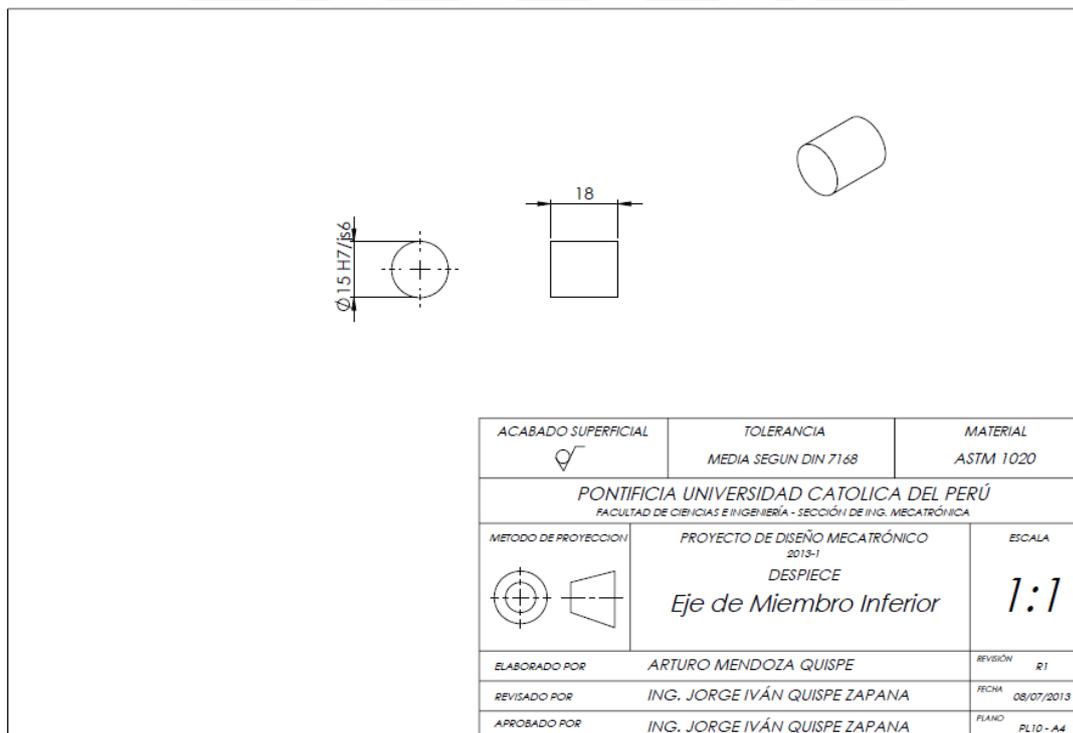


Figura 30: Plano de eje de miembro inferior

3.6.2. Circuito de fuente de batería

La batería se dividirá en dos ramas: la primera llevará 6 V directamente a los motores, y la segunda pasará a través de un LDO para reducirla a 5 V y alimentar a los demás componentes electrónicos. Dicho regulador funcionará dentro los rangos recomendados por el fabricante (ver Anexo 4: Obtención de sollicitaciones mecánicas y electrónicas).

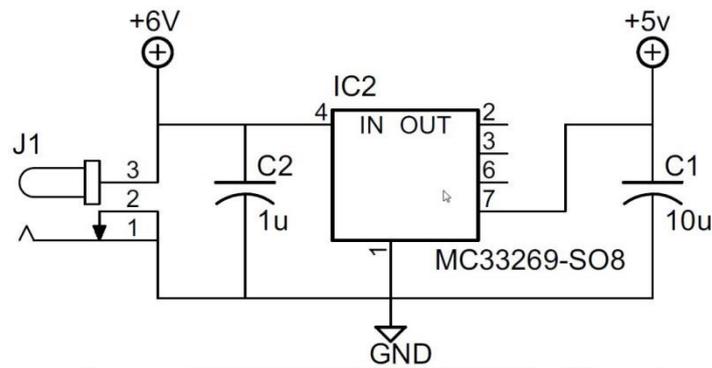


Figura 33: Detalle de las dos ramas de 6 y 5 voltios, y configuración del regulador

Además, se implementó un medidor de batería de modo que se pueda avisar al usuario que la batería está por agotarse. Se aseguró que la corriente que pasa por este divisor de tensión es mínima, de modo que el microcontrolador pueda leer la señal correctamente.

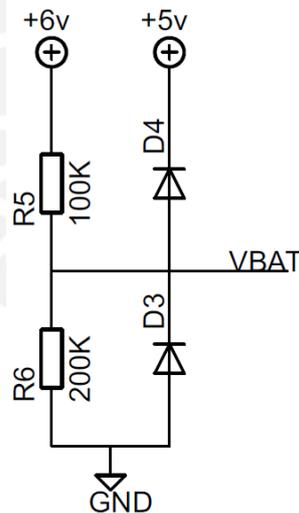


Figura 34: Medidor de batería con un divisor de tensión

3.6.3. Circuito de sensores

Como se explicó anteriormente, el sensor se conectará a modo de divisor de tensión. El valor de voltaje de referencia irá a los puertos ADC del ATMEGA.

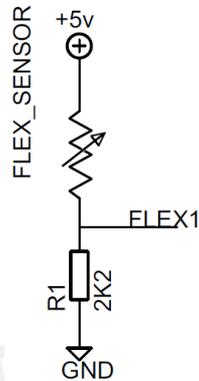


Figura 35: Configuración de divisor de tensión con sensor flexiforce

3.6.4. Circuito de led y pulsadores

El circuito del diodo led se diseñó para que la corriente que pase cuando el pin se encuentre en alta sea aproximadamente 9 mA, lo que está dentro del rango de lo admisible por el led.

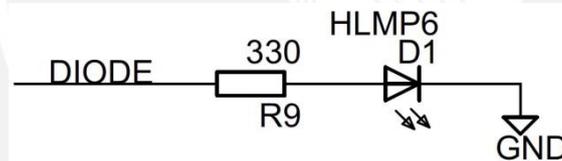


Figura 36: Detalle de circuito de diodo led

Los pulsadores se conectaron con una resistencia pull-down, así cuando se presiona, la corriente que pasa por la resistencia es de 0.5 mA.

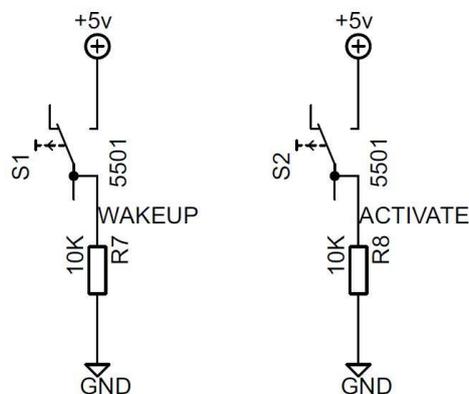


Figura 37: Detalle de circuito de pulsadores

Estos pulsadores estarán ubicados estratégicamente en los eslabones del antebrazo y su funcionamiento se explicará en la lógica de control-.

3.6.5. Circuito de encoder y controlador de motores

Para los motores también se usará un módulo de conexión intermedio además del soporte del motor que permitirá ordenar las conexiones.

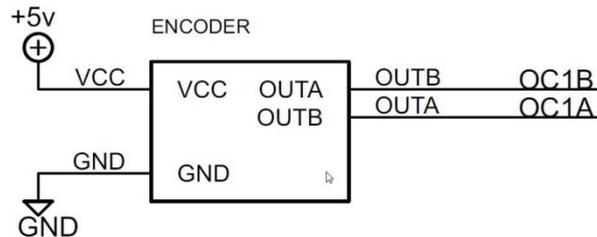


Figura 38: Conexión de pines del encoder

Como se explicó, el controlador de motor sólo se encargará de uno solo.

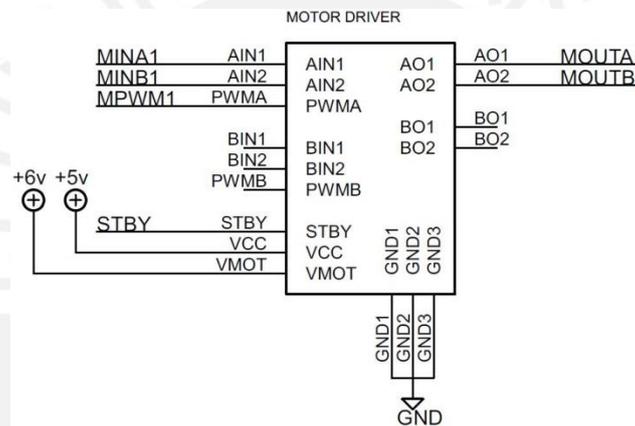


Figura 39: Conexión de pines del controlador de motores

3.7. Diagrama de flujo del programa de control

El sistema de control comienza cuando se despierta al microcontrolador presionando un pulsador. Puesto que se desea, optimizar el uso de la energía, si no se recibe comando alguno, vuelve a al modo ahorro de energía. Como precaución, se verifica que el nivel batería no haya decaído demasiado antes de encender los motores.

Además, como se observa, la acción de acople o desacople requiere que sean dos los pulsadores presionados, de este modo se evita que, por accidente, el usuario inicie una acción indeseada.

Más específicamente, la secuencia de encendido de los motores consiste en prenderlos uno por uno, secuencialmente y, si se detecta que alguno de ellos no se puede mover, se detiene todo el sistema; esto por dos motivos: el primero es reducir considerablemente el consumo de corriente, y el segundo, por seguridad al usuario.

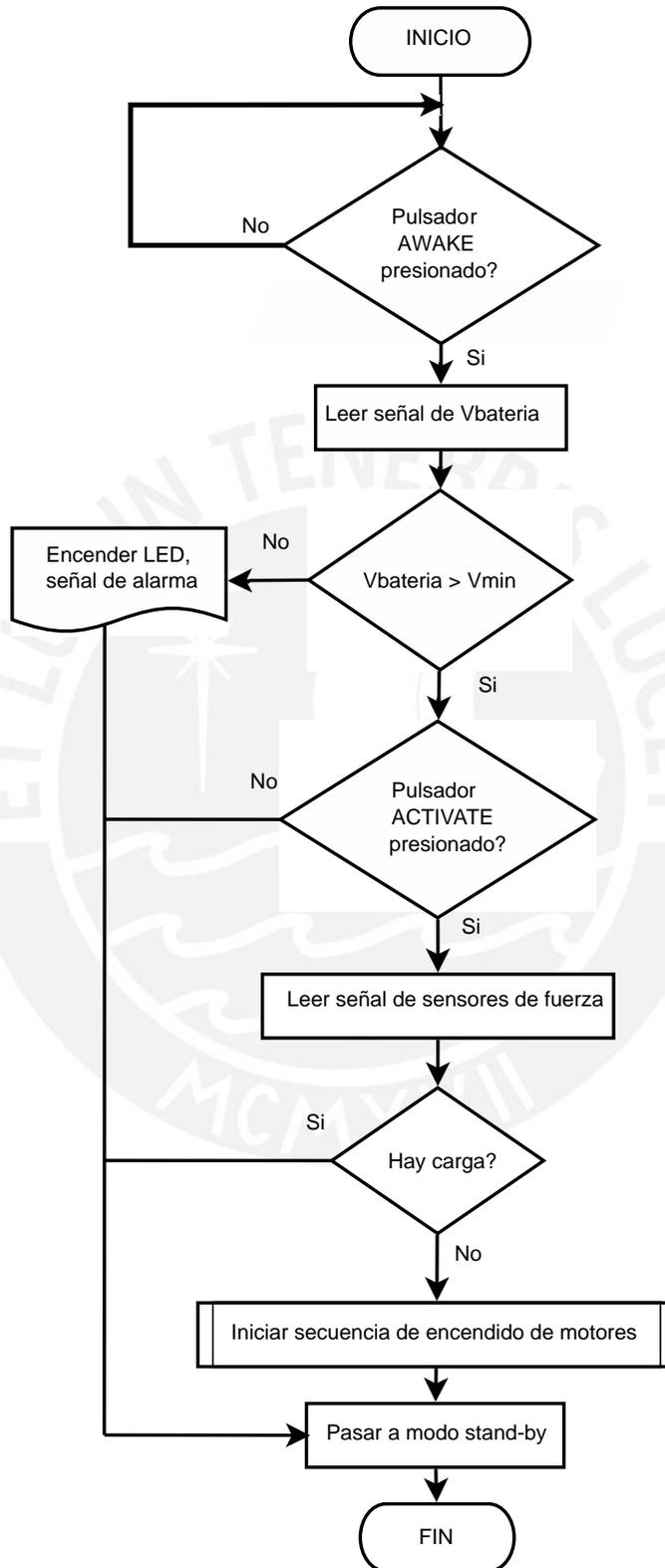


Figura 40: Diagrama de flujo del sistema general

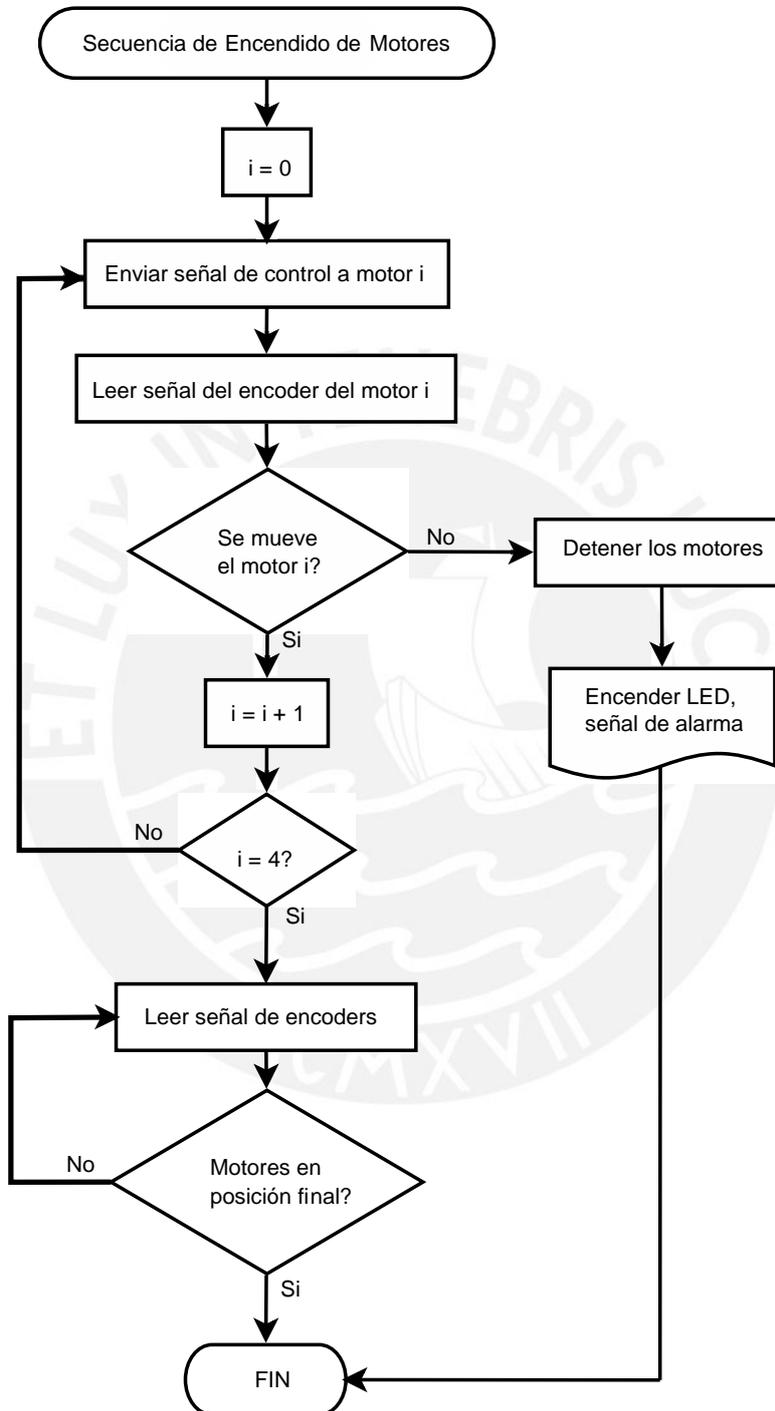


Figura 41: Diagrama de flujo del control de motores

Capítulo 4: Presupuesto

Se utilizó la tasa de cambio vigente al día 08 de Julio de 2013: 1 USD = S/ 2.792

Para los productos importados, se utilizó la información de hojas de datos para calcular el peso total del envío, luego, se procedió a utilizar el servicio web del servicio postal de Estados Unidos para calcular la tarifa de envío. Finalmente, por ser productos importados, se les aplicó un recargo del 30%: 18% por el IGV y 12% aproximadamente por los impuestos aduaneros.

Tabla 1: Presupuesto de componentes de importación

Elemento	USD	S/.
Resortes Smalley Steel Ring Co.	25.00	90.74
Arnés con espaldar	139.35	505.78
Conjunto de batería	4.49	16.30
Conectores Molex varios	14.56	52.85
Regulador de voltaje LDO	0.90	3.27
Costo de envío	150.70	546.98
COSTO TOTAL	335.00 USD	S/. 1,215.92

Tabla 2: Presupuesto de componentes locales

Elemento	S/.
Rodamientos SKF	278.01
Esparrago 1M x 1/2"	12.70
Eje 5/8" de ASTM 1020	20.00
Chapa de 1.2 mm de ASTM A36	78.00
Ertalyte D30mmx30cm	30.68
Planchas de Aluminio 2024 y Mecanizado	11298.50
Cojín Lumbar	38.00
Faja de Trabajo	35.00
Codera	140.00
Recubrimiento de exoesqueleto con plastazote	100.00
Férula de cadera articulada	150.00
Arduino Mega 2560 R3	173.70
PCB de Módulo de conexión intermedio de Arduino	160.65
PCB de Módulo de conexión intermedio de Motores	5.00
Servicio de ensamble de tarjetas	30.00
Componentes electrónicos varios	50.00
Componentes de sujeción varios	10.00
COSTO TOTAL	S/. 12,610.24

Tabla 3: Presupuesto total del proyecto

Elemento	S/.
Componentes nacionales	12,610.24
Componentes internacionales	1,215.92
COSTO TOTAL	S/. 13,856.16

Cabe mencionar que el cálculo de los componentes no detallados (componentes electrónicos, componentes de sujeción) se realizó a través del método de estimación de costos por comparación (analogy cost estimating) [19]. Finalmente, el presupuesto a destinar para este proyecto deberá ser **S/. 14,000.00**



Capítulo 5: Conclusiones

El exoesqueleto robótico podría ser utilizado por los trabajadores de construcción civil para el alivio de la carga dado ya que se tuvieron en cuenta las condiciones de ergonomía, seguridad, viabilidad, factibilidad, autonomía y resistencia mecánica estipuladas en los requerimientos del sistema mecatrónico.

El uso del exoesqueleto robótico previene lesiones músculo-esqueléticas, tales como cervicalgias, lumbalgias, hernias, tendinitis, etc.; las mismas que son frecuentes en este grupo de trabajadores, lo cual podría evitar que tengan problemas futuros que afecten su calidad de vida.

El costo del exoesqueleto resulta, en comparación, más económico que el costo que implica una lesión músculo-esquelética (S/. 14,000.00 vs S/.84,000.00 equivalentes según el I Foro ISTAS de Salud Laboral: lesiones músculo-esqueléticas): horas dejadas de trabajar, gasto en medicamentos, tiempo invertido en fisioterapia, hasta inclusive posibles demandas a la empresa responsable.

Se espera que, con el uso del exoesqueleto robótico, el trabajador de construcción civil pueda aumentar su eficiencia al cargar mayor número de bolsas de cemento (u otros) en el mismo periodo de tiempo, puesto que presentaría menos cansancio.

5.1. Recomendaciones

Este exoesqueleto disminuye la carga de peso en la columna de forma simétrica al distribuir la carga hacia miembros inferiores; sin embargo, es conveniente diseñar un exoesqueleto robótico con miembros superiores e inferiores para efectivamente eliminar la carga al usuario.

Bibliografía

- [1] R. A. R. C. Gopura y K. Kiguchi, «Mechanical designs of active upper-limb exoskeleton robots: State-of-the-art and design difficulties,» *Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference*, pp. 178-187, 2009.
- [2] E. Guizzo y H. Goldstein, «The rise of the body bots,» *Spectrum, IEEE*, vol. 42, n° 10, pp. 50-56, 2005.
- [3] L. Mertz, «The Next Generation of Exoskeletons: Lighter, Cheaper Devices Are in the Works,» *Pulse, IEEE*, vol. 3, n° 4, pp. 56-61, 2012.
- [4] Berkeley University of California, «Berkeley Robotics & Human Engineering Laboratory,» [En línea]. Available: <http://bleex.me.berkeley.edu/>. [Último acceso: 12 Mayo 2013].
- [5] Vanderbilt University, «Center for Intelligent Mechatronics,» [En línea]. Available: http://research.vuse.vanderbilt.edu/cim/research_orthosis.html. [Último acceso: 12 Mayo 2013].
- [6] Baskin Engineering UC Santa Cruz, «Bionics Lab,» [En línea]. Available: http://bionics.soe.ucsc.edu/research/exoskeleton_device_3.html. [Último acceso: 12 Mayo 2013].
- [7] J. C. Perry y J. Rosen, «Design of a 7 Degree-of-Freedom Upper-Limb Powered Exoskeleton,» *Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp. 805-810, 2006.
- [8] J. C. Perry, J. Rosen y S. Burns, «Upper-Limb Powered Exoskeleton Design,» *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, vol. 12, n° 4, pp. 408-417, 2007.
- [9] N. Jarrassé y G. Morel, «Connecting a Human Limb to an Exoskeleton,» *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, vol. 28, n° 3, pp. 697-709, 2012.
- [10] H. Kobayashi y H. Nozaki, «Development of Muscle Suit for Supporting Manual Worker,» *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1769-1774, 2007.
- [11] M. Okada y Y. Nakamura, «Development of a Cybernetic Shoulder—A 3-DOF Mechanism That Imitates Biological Shoulder Motion,» *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, vol. 21, n° 3, pp. 438-444, 2005.
- [12] Y. Mao y S. K. Agrawal, «Design of a Cable-Driven Arm Exoskeleton (CAREX) for Neural Rehabilitation,» *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, vol. 28, n° 4, pp. 922-931, 2012.

- [13] A. Schiele y F. C. T. v. d. Helm, «Kinematic Design to Improve Ergonomics in Human Machine Interaction,» *IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL SYSTEMS AND REHABILITATION ENGINEERING*, vol. 14, n° 4, pp. 456-469, 2006.
- [14] Cyberdyne, «Robot Suit HAL,» [En línea]. Available: <http://www.cyberdyne.jp/english/robotsuithal/index.html>. [Último acceso: 12 Mayo 2013].
- [15] V. A. D. Cai, Contribution à l'étude d'exosquelettes isostatiques pour la rééducation fonctionnelle, application à la conception d'orthèses pour le genou, Paris, Francia, 2011.
- [16] R. Gutierrez, P. A. Niño-Suarez, O. F. Avilés-Sanchez, F. Vanegas y J. Duque, «Exoesqueleto Mecatrónico para Rehabilitación Motora,» *8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, 2007.
- [17] Organización Internacional del Trabajo, Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo, España: Editorial de la Organización Internacional del Trabajo, 2012.
- [18] K. F. Paulsen Moscoso, Elementos de Máquinas 1 Uniones entre eje y cubo, 2011.
- [19] Project Management Institute, Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK), Atlanta, USA: PMI Publications, 2008.
- [20] C. J. Hamilton, S. A. Jamal, T. J. Beck, A. S. Khaled, J. D. Adachi, J. P. Brown y K. S. Davison, «Heterogeneity in Skeletal Load Adaptation Points to a Role,» *Journal of Clinical Densitometry: Assessment of Skeletal Health*, 2013.
- [21] A. V. Ramírez, «Antropometría del trabajador minero de la altura,» *Anales de la Facultad de Medicina Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, pp. 298-309, 2006.
- [22] V. V. Libardo, Conceptos Básicos sobre Diseño de Máquinas.
- [23] H. Kobayashi, M. Iba y H. Suzuki, «Posture Control of a Muscle Suit for the Upper Limb,» *Mechatronics and Automation, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference*, pp. 7-12, 2006.
- [24] R. A. R. C. Gopura y K. Kiguchi, «Mechanical Designs of Active Upper-Limb Exoskeleton Robots,» *2009 IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics*, pp. 178-187, 2009.
- [25] H. Kobayashi y H. Suzuki, «Development of a New Shoulder Mechanism for a Muscle Suit,» *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation*, pp. 1051-1056, 2005.
- [26] T. Aida, H. Nozaki y H. Kobayashi, «Development of Muscle Suit and Application to Factory Laborers,» *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on*

Mechatronics and Automation, pp. 1027-1032, 2009.

- [27] P. Garrec, J. Friconneau, Y. Méasson y Y. Perrot, «ABLE, an Innovative Transparent Exoskeleton for the Upper-Limb,» *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1483-1488, 2008.
- [28] F. C. O. C. F. McDowell MA, «Anthropometric Reference Data for Children and Adults: United States, 2003–2006,» *National Health Statistics Reports*, nº 10, pp. 1-48, 2008.
- [29] M.-A. Lavoie, Développement et contrôle d'un bras robotique basé sur l'actionneur différentiel élastique, Québec, Canada, 2009.
- [30] R. Gutierrez, P. A. Niño-Suarez, O. F. Avilés-Sanchez, F. Vanegas y J. Duque, «Exoesqueleto Mecatrónico para Rehabilitación Motora,» *8º Congreso Iberoamericano de ingeniería Mecánica*, 2007.
- [31] J. J. Callaghan, A. G. Rosenberg y H. E. Rubash, *The Adult Hip*, Volume 2, Philadelphia, USA: Lippincott Williams & Wilkins, 2007.
- [32] J. V. Bono, *Revision total hip arthroplasty*, New York, USA: Springer, 1992.