



**Universidad
Europea**

UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

ÁREA INGENIERÍA INDUSTRIAL

MÁSTER UNIVERSITARIO EN

INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**APLICACIÓN DE SEA EN SISTEMAS DE
EXOESQUELETO PARA ARTICULACION DE
CODO**

Alumno: Nicolás Quílez Andrés

Director: Víctor Manuel Padrón Nápoles

06 JULIO 2023

TÍTULO: Aplicación de sea en sistemas de exoesqueleto para articulación de codo

AUTOR: Nicolás Quílez Andrés

DIRECTOR DEL PROYECTO: Víctor Manuel Padrón Nápoles

FECHA: 06 de Julio de 2023

RESUMEN:

El proyecto estudia el desarrollo de un exoesqueleto para la articulación del codo.

En primer lugar, se procede al estudio del estado del arte, analizando la evolución de los exoesqueletos hasta el día de hoy, el estado actual de su aplicación en todo diversos sectores de la economía, y como la aplicación de estos dispositivos mecánicos contribuye a salvaguardar la salud de sus usuarios, pues conlleva un menor esfuerzo y evita la degeneración acelerada de ciertas partes del cuerpo humano, que se produzcan lesiones y que se desarrollen enfermedades de origen laboral.

A partir de estas premisas, se diseña y desarrolla un exoesqueleto sencillo, intentando que sea lo más asequible para poder ser utilizado en el sector hostelero. Esta aplicación de la robótica blanda puede suponer un buen punto medio entre los, cada vez más populares para los trabajadores, exoesqueletos pasivos y los exoesqueletos de tipo activo que por su altísimo coste solo los sectores industriales y militares más pudientes se pueden permitir.

Palabras clave: Electrónica, Sensorización, Control, Exoesqueleto, Biomecánica

ABSTRACT:

The project studies the development of an exoskeleton for the elbow joint.

First of all, we proceed to the study of the state of the art, analyzing the evolution of exoskeletons until today, the current state of its application in all different sectors of the economy, and how the application of these mechanical devices helps to safeguard the health of its users, as it involves less effort and prevents the accelerated degeneration of certain parts of the human body, injuries and the development of occupational diseases.

Based on these premises, a simple exoskeleton is designed and developed, trying to make it as affordable as possible to be used in the hospitality sector. This application of soft robotics can be a good middle ground between the increasingly popular for workers, passive exoskeletons and active type exoskeletons that due to their very high cost only the most affluent industrial and military sectors can afford.

Key words: Electronics, Sensorization, Control, Exoeskeleton, Biomechanics

Glosario y Siglas:

Supinación brazo: Movimiento del antebrazo de flexión o extensión

Serial Elastic Actuators (SEA) : Actuadores con un sistema elástico en serie

Revoluciones Por Minuto (rpm)

Battery Management System (BMS)

I2C: Protocolo de comunicación de 2 hilos (señal de reloj y comunicación) con maestro y esclavo

Serial Peripheral Interface (SPI): Protocolo de comunicación con maestro y esclavo para comunicación síncrona

Universal Asynchronous Receiver / Transmitter (UART): Protocolo de comunicación asíncrona

Micro Controller Unit (MCU)

Single Board Computer (SBC)

Pulse Wave Modulation (PWM)

Input/Output (I/O)

Toma de tierra/ Negativo (GND)

Baterías Polímero de Litio (LiPo)

Índice

RESUMEN:	3
ABSTRACT:.....	4
Glosario y Siglas:	5
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.2 OBJETIVO DEL PROYECTO	14
Capítulo 2 ESTUDIOS PREVIOS / ESTADO DEL ARTE	15
2.1 INTRODUCCIÓN A LOS EXOESQUELETOS.....	15
2.1.1 Exoesqueletos Pasivos	15
2.1.2 Exoesqueletos Activos	22
Capítulo 3 ANÁLISIS TEÓRICO DEL DISEÑO.....	28
3.1 Anatomía humana.....	28
3.1.1 Músculos	29
3.1.2 Ligamentos y tendones	29
3.1.3 Lesiones y enfermedades laborales.....	30
3.2 Principios mecánicos	32
3.2.1 Fuerza y Leyes de newton	32
3.2.2 Ratio de reducción transmisión de potencia.....	35
3.3 Componentes almacenadores de energía mecánica.....	41
3.3.1 Introducción a Muelles y resortes elásticos.....	41
3.3.2 Serial Elastic Actuators.....	47
3.4 Sistema de Control.....	54
3.4.1 Introducción a los sistemas de control.....	54
3.4.2 Controladores PID	55
3.4.3 Sucesos en la regulación de un sistema	58
3.5 Motores eléctricos.....	62
3.5.1 Motores de corriente alterna (C.A. o AC)	62
3.5.2 Motores de Corriente Continua (C.C. o DC).....	63
3.5.3 Motores característicos	63
3.5.4 Servomotores	64

3.5.5	Frenos y frenada regenerativa	64
3.6	Fuentes de alimentación	65
Capítulo 4	HARDWARE NECESARIO PARA UN PROTOTIPO	69
4.1	Simulaciones.....	69
4.2	Sistema propuestos	89
4.3	Motores	89
4.3.1	Propuesta Ideal	89
4.3.2	Propuesta de compromiso realista	94
4.4	Sensores.....	96
4.4.1	Posición.....	96
4.4.2	Fuerza	98
4.4.3	Esfuerzo	102
4.5	Electrónica de control.....	105
4.5.1	Arduino Nano	105
4.5.2	Raspberry	111
4.6	Alimentación y consumos	115
4.6.1	Carga y duración del trabajo	115
Capítulo 5	DESARROLLO DEL SOFTWARE	119
5.1	Programación.....	119
5.2	Ajustes de control	123
5.3	Funcionamiento y montaje	124
Capítulo 6	Caso Práctico	126
Capítulo 7	MEJORAS Y POSIBLES DESARROLLOS.....	128
7.1	Circuito de seguridad	128
7.2	Freno para la reducción de consumos	128
7.3	Mejores baterías	129
7.4	Mejores componentes.....	130
7.5	Mejores algoritmos.....	130
7.6	Mejor Interfaz	130
Capítulo 8	CONCLUSIONES	131
Capítulo 9	ANEXOS.....	132
Capítulo 10	PRESUPUESTO.....	135

Capítulo 11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	138
---	-----

Índice de Ilustraciones

Figura 1 Boceto de sistema para facilitar el andar, correr y saltar por Nicholas Yagn Patente US440684, [2].....	16
Figura 2 CarrySuit de AUXVIVO [3]	17
Figura 3 Desplazamiento de cargas de forma colaborativa [3]	17
Figura 4 Permite el uso de las manos mientras se transporta la carga [3].....	18
Figura 5 Comparativa del esfuerzo con y sin el exoesqueleto CarrySuit [3]	19
Figura 6 LiftSuit 2 de la compañía AUXIVO [4]	19
Figura 7 Grafica de distribución de un esfuerzo medio de los músculos sin el LiftSuit (en rojo) y con el LiftSuit (en azul) [4].....	20
Figura 8 Reducción del esfuerzo para los músculos en el LiftSuit [4]	21
Figura 9 Ottobock Shoulder para trabajos realizados por encima de los hombros de la empresa Ottobock [5]	21
Figura 10 Ottobock Back para cargas pesadas de la empresa Ottobock [6]	22
Figura 11 Ilustración del “Pedomotor” de Leslie C. Kelley, patente US1308675 [7]..	23
Figura 12 Ilustración del sistema de vapor que alimentaba el “Pedomotor” de Leslie C. Kelley [7].....	24
Figura 13 Modelos de los exoesqueletos XOS 2 de Raytheon y Sarcos para uso militar en 2011 [8].....	25
Figura 14 Guardian XO de Sarcos para su uso en Industria.....	26
Figura 15 Diagrama simplificado del movimiento del codo en la anatomía humana [11]	28
Figura 16 Posicionamiento del Bíceps y el Braquial (Wikimedia Commons)	29
Figura 17 Ilustración de los ligamentos en el codo y como mantiene el codo unido [12].....	30
Figura 18 Boceto del momento aplicado sobre una barra o bisagra con centro de giro (estudios propios).....	33
Figura 19 Boceto distribución de fuerzas para el momento (estudios propios).....	34
Figura 20 Boceto distancia del centro al punto de aplicación de la fuerza para el momento (estudios propios).....	34
Figura 21 Grafica ilustrativa de como las curvas de Par y Potencia máximos evolucionan según las revoluciones por minuto de un motor de combustión (estudios propios)	35
Figura 22 Tabla comparativa de algunos tipos comunes de bandas/correas [15].....	36
Figura 23 Conexiones y cambios de direcciones posibles con un sistema de engranajes [15]	37
Figura 24 relación de reducción en un tren de engranajes [15]	38
Figura 25 Partes y relación de un sistema de engranajes planetarios [15]	39
Figura 26 Desplazamiento de los dientes al deformarse la corona (estudios propios & [16]).....	40

Figura 27 Diagrama comparativo de cómo actúa la ley de Hooke [17]	42
Figura 28 Diagrama de un sistema muelle amortiguador (estudios propios & [18]) ..	43
Figura 29 Sistema de Muelle y amortiguador en un vehículo [19].....	43
Figura 30 Muelle de torsión de un mecanismo de un reloj [20]	45
Figura 31 Ejemplos de muelles mecánicos [15]	45
Figura 32 Diagrama e un muelle hidro-neumático [21]	46
Figura 33 Diagrama de componentes de un SEA no amortiguado / amortiguado sin sensorizar (estudios propios) [22], [23]	48
Figura 34 Diagrama de cuerpo libre de un sistema SEA y los movimiento y pares que actúan sobre ellos [22]	49
Figura 35 SEA mecánico de un sistema de tornillo sin fin con muelles,[23]	50
Figura 36 Diagrama de los elemento de un SEA mecánico [23]	51
Figura 37 Sistema de un SEA hidráulico con muelles y amortiguadores [23]	51
Figura 38 Diagrama de un SEA hidráulico con muelles y compresores [23].....	52
Figura 39 SEA torsional con transmisión que detecta los cambios de fuerza requeridos [22]	52
Figura 40 Diagrama de un sistema de control de lazo cerrado estandarizado (estudios propios & [24])	55
Figura 41 Sistema de control PID [24]	55
Figura 42 Grafica de respuesta de un sistema ante un escalón [24]	56
Figura 43 Tabla de cálculo de PID del 1º método de Ziegler-Nichols [24]	56
Figura 44 Grafica de un sistema que se ha forzado a oscilar [24]	57
Figura 45 Tablas del 2º método de Ziegler-Nichols [24].....	57
Figura 46 Sistema de ejemplo lazo abierto ante una señal escalón de valor 1 [24]..	58
Figura 47 Sistema de ejemplo de control con solo Proporcional [24].....	59
Figura 48 Sistema de ejemplo de control con Proporcional e Integral [24]	60
Figura 49 Sistema de ejemplo de control con PID para una respuesta critica [24] ...	60
Figura 50 ensamblaje de Codo simple	69
Figura 51 como exportar a Matlab Simscape Multibody el ensamblaje de Codo simple.....	70
Figura 52 Como se realiza la importación de los archivos generados en SolidWorks a Matlab	71
Figura 53 Modelo de simulación resultante de la importación.....	71
Figura 54 Modelo generado ordenado para mayor claridad	72
Figura 55 Modificación del parámetro de dirección de la gravedad	72
Figura 56 Ventana resultante de iniciar la simulación	73
Figura 57 Fuerza gravitatoria que genera un movimiento de péndulo	73
Figura 58 Opciones de entradas y salidas disponibles en el cuadro de revolución ..	74
Figura 59 Uso de conversores PS-Simulink para poder graficar los distintos parámetros.....	75
Figura 60 Grafica de movimiento de péndulo del codo sobre valores de posición, velocidad y par	75
Figura 61 Cambio de unidades de posición a grados para mejor visualizacion	76

Figura 62 Caracterización de los parámetros iniciales del codo	77
Figura 63 Respuesta de par ante la carga intrínseca de la articulación	78
Figura 64 Configuración de la saturación de una rampa y comprobación de la misma	79
Figura 65 Configuración para añadir una carga adicional configurable al sistema de simulación	80
Figura 66 Grafica de parámetros para la compensación de 1Kg adicional para el sistema.....	80
Figura 67 Grafica para mantenimiento de la posición rampa de par hasta el máximo en 1 segundo	81
Figura 68 para mantenimiento de la posición rampa de par hasta el máximo en 0.5 segundos	82
Figura 69 para mantenimiento de la posición rampa de par hasta el máximo en 0.25 segundos	82
Figura 70 Diagrama de bloques para el sistema de control + SEA.....	83
Figura 71 Grafica de parámetros de posición, velocidad y par del sistema + SEA ...	84
Figura 72 Grafica de reacción de los parámetros de posición, velocidad y par del sistema + SEA para una carga adicional de 3 Kg	84
Figura 73 Grafica de reacción de los parámetros de posición, velocidad y par del sistema + SEA para una carga adicional de 4Kg	85
Figura 74 Reacción de los parámetros al incluir una masa variable con el tiempo (0- 3Kg)	86
Figura 75 Reacción de los parámetros al incluir una masa variable con el tiempo (0- 4Kg)	87
Figura 76 Comparación de los los parámetros de posición, velocidad y par del sistema con muelle de ganancia x5	88
Figura 77 Ejemplo de motor de perfil plano de la empresa Maxon [27] ANEXO 1....	89
Figura 78 Combinaciones de complementos para el motor	90
Figura 79 Coste de reductores planetarios	90
Figura 80 Características de datos motor más información en ANEXO.....	91
Figura 81 Coste de enconder montables para motor escogido.....	91
Figura 82 Precios controladores Maxon.....	92
Figura 83 Combinación de un motor de alto par compacto y pequeño.	93
Figura 84 Servo motor de alto par CYS-S0650.....	94
Figura 85 Tabla características del Servomotor página fabricante CYS	95
Figura 86 Diagrama explicativo PWM de How to Mechatronics [28].....	96
Figura 87 Diagrama explicativo PWM de How to Mechatronics [28].....	97
Figura 88 Diagrama ilustrativo del funcionamiento de una célula de carga [29]	98
Figura 89 Diagrama de un puente de Wheatstone proveído por el fabricante [29] ...	99
Figura 90 Diagrama datasheet INA125 Texas Instruments	100
Figura 91 Diagrama de conexión al encapsulado Texas Instruments.....	101
Figura 92 Tabla valores funcionamiento INA125	101
Figura 93 Desglosado de partes del MyoWare datasheet fabricante [30].....	102

Figura 94 Explicación de posicionamiento para lectura datasheet MyoWare [30] ..	103
Figura 95 Filtrado de lecturas de la señal del sensor MyoWare [30].....	104
Figura 96 Alimentación y cableado recomendado por el fabricante [30].....	104
Figura 97 Arduino nano 33 IoT [31].....	105
Figura 98 Pinout de Arduino Nano 33 IoT [31]	107
Figura 99 Configuración del IDE de Arduino selección puerto	109
Figura 100 Selección placa en el IDE	110
Figura 101 Raspberry Pi Pico	112
Figura 102 Pinout de la Raspberry Pi Pico	113
Figura 103 Programación drag and drop Raspberry Pi Pico W.....	114
Figura 104 Programación en IDE para Raspberry Pi Pico W.....	114
Figura 105 Batería LiPo ligera de baja capacidad (página del vendedor Zeee).....	116
Figura 106 Comparativa de baterías de mayor capacidad de otra marca de baterías (Pagina vendedor Ovonic)	117
Figura 107 monitor de batería con alarma Arceli 1-8s LiPo Monitor (Pagina vendedor Arceli).....	118
Figura 108 Diagrama lógica de programa 1	120
Figura 109 Diagrama lógica de programa 2 uso de par en el control.....	121
Figura 110 Diagrama lógica de programa 3 Sistema anti saturación del error de posicion	122
Figura 111 Diagrama eléctrico interactivo creado en Wowki	124
Figura 112 Control de mapeado para el servo del rango 0-60° para el potenciómetro (EMG) de valores 0-1023.....	125
Figura 113 Distribución de carga en Exoesqueleto de como el exoesqueleto protege la articulación	126
Figura 114 Soporte del exoesqueleto para movimientos repetitivos mediante un mecanismo elastico.....	127
Figura 115 Whitepaper Peperl & Fuchs sobre niveles de seguridad y riesgo [32] ..	128
Figura 116 freno implementado en motor Maxon group [33]	129

Índice de Tablas

Tabla 1 Comparación resumida de los efectos de los distintos elementos de un PID	61
Tabla 2 Funciones de cada pin en Arduino Nano [31] ANEXO 2	108
Tabla 3 Lista de voltajes y consumos componentes electrónicos (estudios propios basados en datasheets de los componentes)	115

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El trabajo de carácter físico requiere a menudo de un gran esfuerzo y de la repetición de algunos movimientos que produce una degradación a largo plazo de las articulaciones, huesos, músculos, etc.

Existen algunos aparatos en desarrollo y comercialización que responden parcialmente a algunos de estos problemas, pero algunos son más de carácter terapéutico (subsanan gente que sufre de alguna lesión) o sustitutivo en el caso de las prótesis para reemplazar extremidades perdidas/dañadas.

Por otro lado existen equipos que podrían hacer frente a estos problemas, disminuyendo significativamente la carga que sufren las personas durante su jornada laboral, pero muchas veces están sobredimensionados, ya que están pensados para industrias pesadas donde las cargas que se manejan ronda a menudo el centenar de kilos y requieren de una inversión monetaria alta, debido al perfil del cliente que los compra.

1.2 OBJETIVO DEL PROYECTO

Plantear una alternativa innovadora para ofrecer un sistema capaz de reducir los problemas mencionados en el anterior punto, ofreciendo un mejor equilibrio de funcionalidad/ precio mediante el uso de electrónica disponible al público general y el uso de fabricación aditiva que puede ayudar a simplificar los procesos de su construcción al igual que permitir cierto grado de personalización necesario para estos equipos que suelen ser comúnmente referidos como exoesqueletos.

Capítulo 2 ESTUDIOS PREVIOS / ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN A LOS EXOESQUELETOS

Los exoesqueletos son considerados un tipo maquinaria móvil que permite a quien la lleva, sobre una o más partes de su cuerpo, obtener mejoras de ergonomía, apoyo estructural y/o aguante físico mediante el uso de mecanismo que aumente el límite de carga que el cuerpo puede manejar y controlar con cierto grado de agilidad [1].

Normalmente estos exoesqueletos se dividen en dos grupos según los mecanismos empleados para otorgar las características anteriormente descritas:

- Exoesqueletos Pasivos
- Exoesqueletos Activos

A continuación se procederá a profundizar en cada uno de ellos.

2.1.1 Exoesqueletos Pasivos

Como su nombre indica, aportan una ayuda pasiva al usuario en proporcionándole un ayuda para soportar cargas que por su tamaño o peso producirían un sobreesfuerzo en los hombros, caderas y espalda del usuario.

Algunos prototipos de estos sistemas fueron patentados tan pronto como 1890, sin embargo tenían varias limitaciones debido a la tecnología de la época.

El sistema dependía de un sistema de gas presurizado que requería de un aporte de energía por parte del usuario y además el transporte de una bombona de gas presurizado, la cual lo hacía poco portátil además de añadir cargas adicionales sobre distintas partes del cuerpo, como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

(No Model.)

2 Sheets—Sheet 1.

N. YAGN.

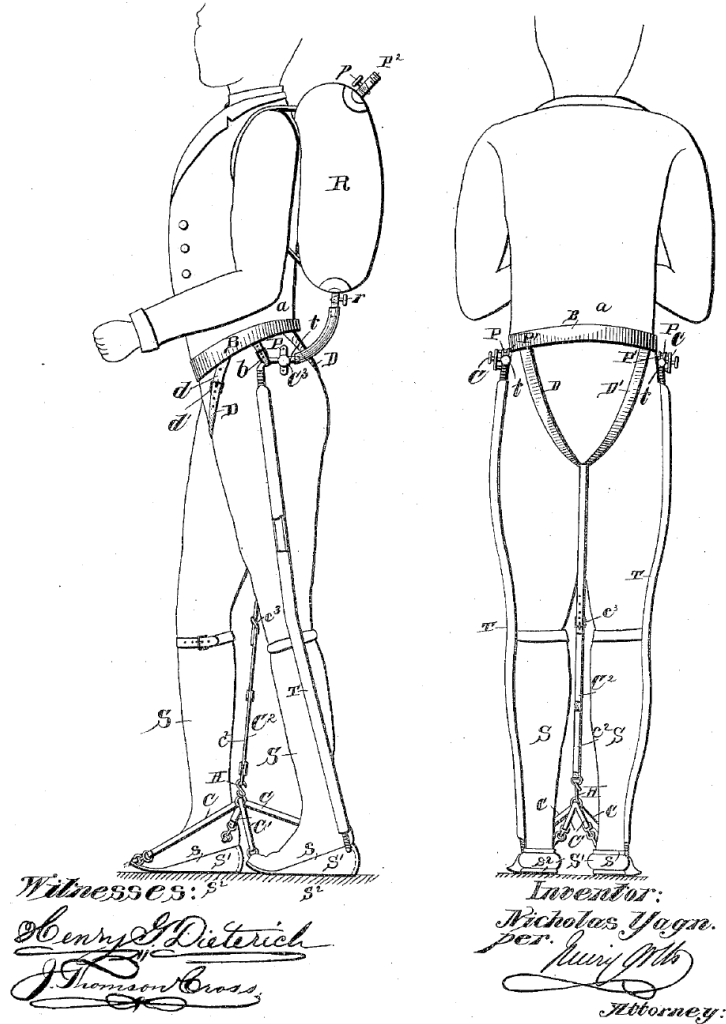
APPARATUS FOR FACILITATING WALKING, RUNNING, AND JUMPING.

No. 440,684.

Patented Nov. 18, 1890.

Fig. 1.

Fig. 2.



THE MORRIS KETTER CO., PHOTO-LITHO., WASHINGTON, D. C.

Figura 1 Boceto de sistema para facilitar el andar, correr y saltar por Nicholas Yagn Patente US440684, [2]

En la actualidad estos sistemas han sido cada vez más refinados, con el avance de nuevos materiales más ligero y con la posibilidad de almacenar la suficiente energía en polímeros elástico, hoy en día estos exoesqueletos se comercializan al público.

Algunos ejemplos de ellos con el CarrySuit de AUXIVO mostrado en la Figura 2



Figura 2 CarrySuit de AUXIVO [3]

Este exoesqueleto funciona como un arnés de reparto de las cargas transportadas, permitiendo colgar objetos pesados del arnés ya sea de forma individual o colaborativa, reduciendo el esfuerzo realizado al localizar la carga más cerca del centro de gravedad y permitiendo posicionar dichos objetos de forma que se liberen las manos para mayor estabilidad o apoyo en terrenos irregulares y zonas en altura como se muestran en la Figura 3 y Figura 4.



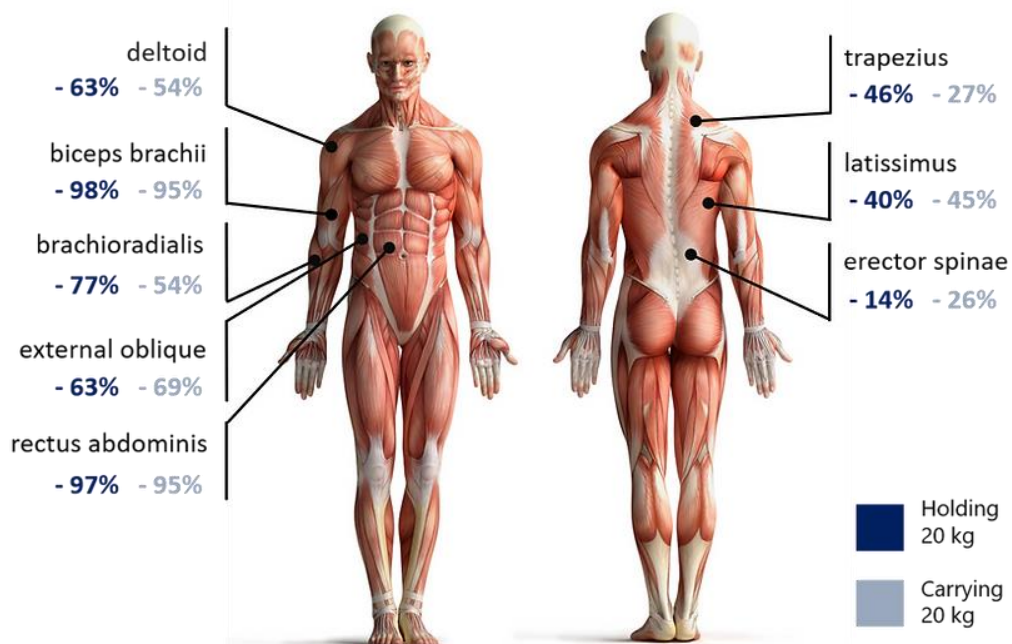
Figura 3 Desplazamiento de cargas de forma colaborativa [3]



Figura 4 Permite el uso de las manos mientras se transporta la carga [3]

Este modelo en particular a través de sus estudios y pruebas particulares promete una gran reducción de la carga de los músculos.

De hecho como se muestra en la Figura 5 para una carga de 20 Kg se reduce el esfuerzo ejercido en hasta un 98% en los brazos, hasta un 46% en los hombros y hasta un 45% en los músculos de la espalda. Obteniendo así reducir el esfuerzo realizado (contemplado como una reducción del ritmo cardiaco de hasta un 19%).



HEART RATE REDUCTION

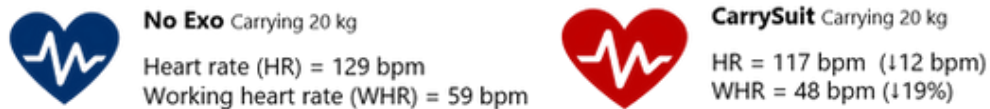


Figura 5 Comparativa del esfuerzo con y sin el exoesqueleto CarrySuit [3]

Otro tipos de Exoesqueleto es aquel que intentar reducir los picos de esfuerzo, sobre todo en tareas repetitivas comunes como puede ser el inclinarse para levantar un objeto, por ejemplo de la misma compañía AUXIVO se ofrece el LiftSuit mostrado en la Figura 6.

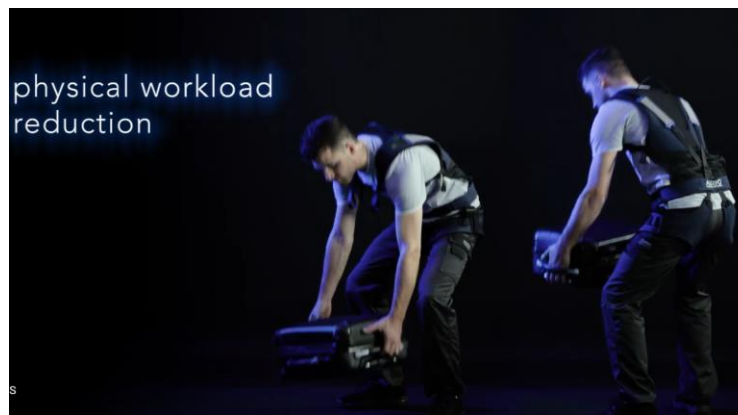


Figura 6 LiftSuit 2 de la compañía AUXIVO [4]

El LiftSuit utiliza el concepto de energía biomecánica, mediante unas tiras de material elástico, el sistema se carga de energía al inclinarse o agacharse, de forma que cuando es necesario incorporarse o levantar una carga, se puede recuperar casi la totalidad de la energía usada en el anterior desplazamiento realizando así un menor esfuerzo o al menos uno mejor distribuido en el tiempo como se ve en la Figura 7.

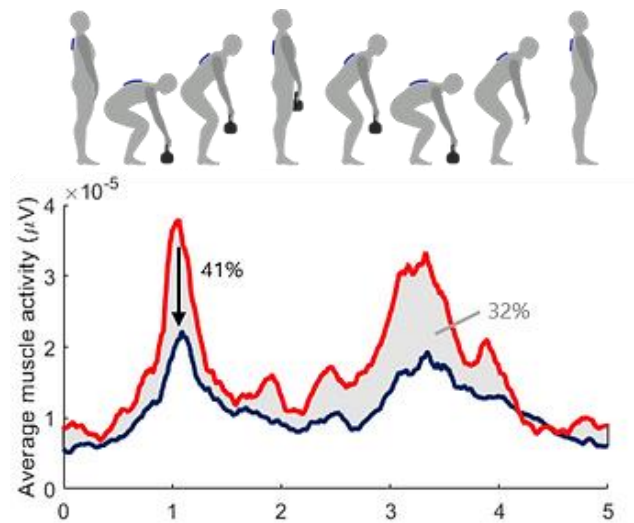


Figura 7 Grafica de distribución de un esfuerzo medio de los músculos sin el LiftSuit (en rojo) y con el LiftSuit (en azul) [4]

Este sistema distribuye el esfuerzo y permite reducir la carga sobre el cuerpo en los movimientos para los que fue pensado inicialmente, ya que de querer realizar un movimiento en sentido contrario para el cual fue diseñado, se doblaría el esfuerzo necesario en la que podemos observar los músculos que se benefician de una carga reducida.

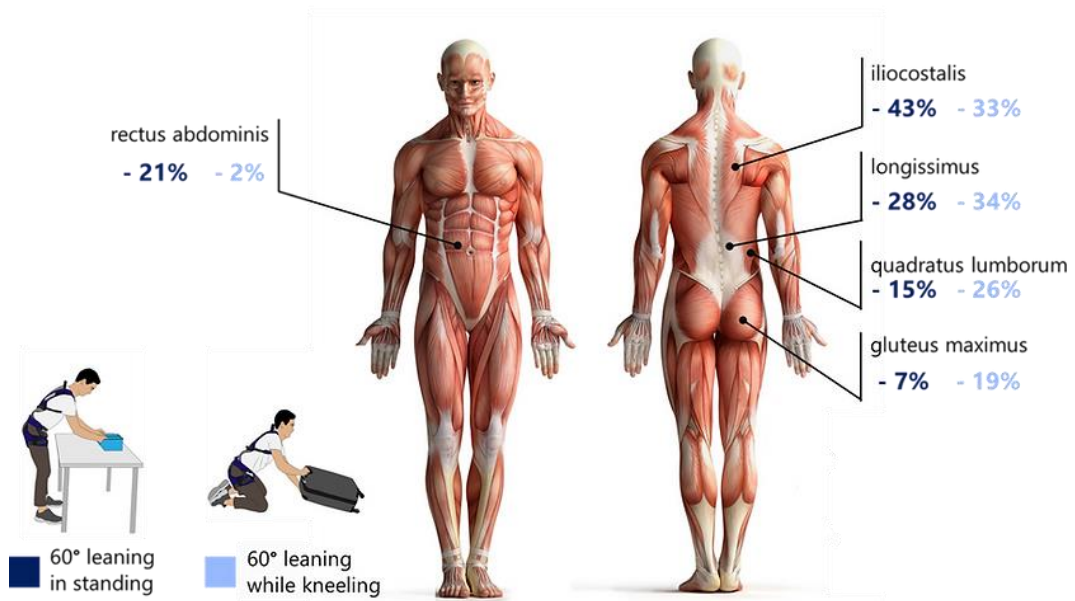


Figura 8 Reducción del esfuerzo para los músculos en el LiftSuit [4]

Existen versiones similares de estos sistemas que aprovechan sistemas de recuperación de energía similares de la empresa Ottobock, en particular el Ottobock Shoulder mostrado en la Figura 9 y el Ottobock Back, en la Figura 10, el cual con un sistema de recuperación de energía similar, permite compensar el peso de los brazos para facilitar la realización de trabajos a brazos alzados, muy común en las industrias del automóvil y aeroespaciales.



Figura 9 Ottobock Shoulder para trabajos realizados por encima de los hombros de la empresa Ottobock [5]

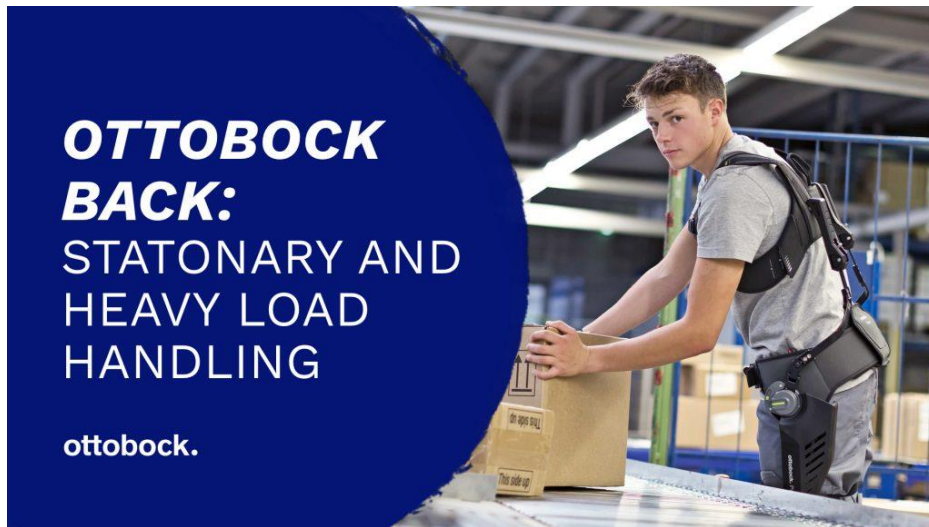


Figura 10 Ottobock Back para cargas pesadas de la empresa Ottobock [6]

Este tipo de sistemas permite reducir hasta en un 40% la carga en los músculos y las articulaciones además el uso de un sistema de recuperación de energía mecánico permite un mejor uso de la energía recuperada y la posibilidad de su activación y desactivación en el caso del Ottobock back para cuando no sea necesario realizar esfuerzos de levantamiento de cargas.

2.1.2 Exoesqueletos Activos

Mientras que los exoesqueletos pasivos se pueden considerar un sistema cerrado donde la suma del trabajo realizado se acerca a cero, ya que como mucho se aprovecha la gravedad y los movimientos de aproximación para una tarea con el fin de cargar de energía un sistema elástico que permite facilitar el movimiento en reverso, estos difieren de los sistemas activos.

Los sistemas de exoesqueletos activos no son abiertos, estos sistemas tienen:

- Actuadores que proporcionan trabajo bajo demanda
- Sensores que regulan varios aspectos de los actuadores (posición, velocidad, carga/descarga)
- Sistemas de alimentación para el sistema

Los primeros prototipos de estos sistemas aparecen patentados en 1919

Los actuadores consistían en unos ligamentos artificiales que dependían de un sistema de vapor de agua presurizado.

La Sensorización del sistema era casi nula, más allá de unos cables y topes mecánicos que permitiesen su funcionamiento y evitasen accidentes, y muy importante una válvula de accionamiento manual para la regulación de la presión del vapor en el sistema.

Por últimos el sistema requería el transporte de un pequeño motor de vapor en la espalda como sistema de alimentación, la cual lo hacía poco portátil además de añadir cargas adicionales sobre distintas partes del cuerpo, como se puede observar en la Figura 11 .

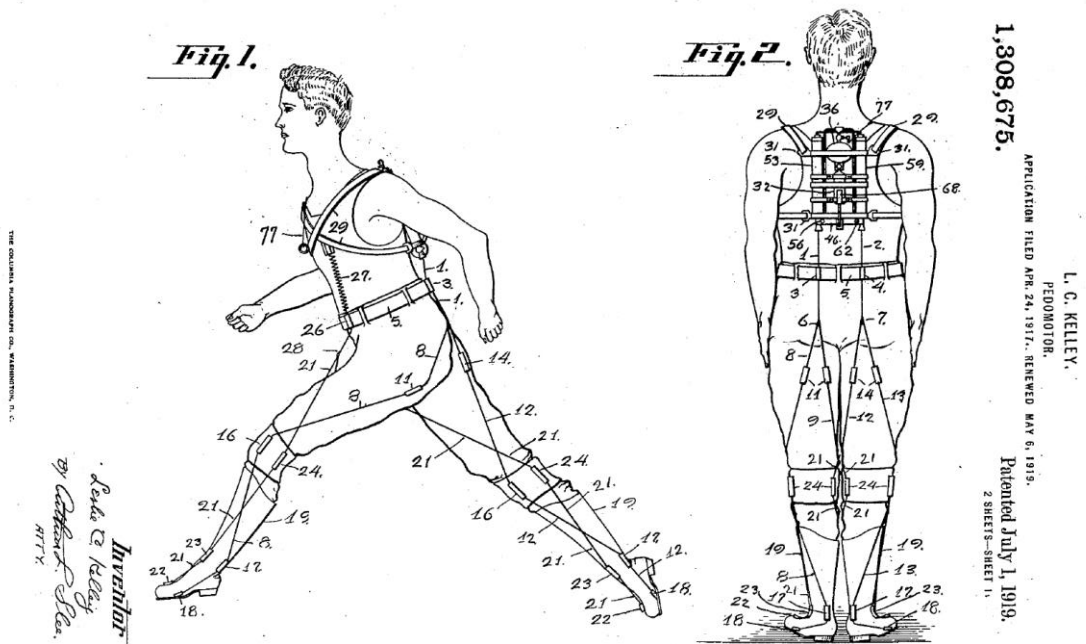


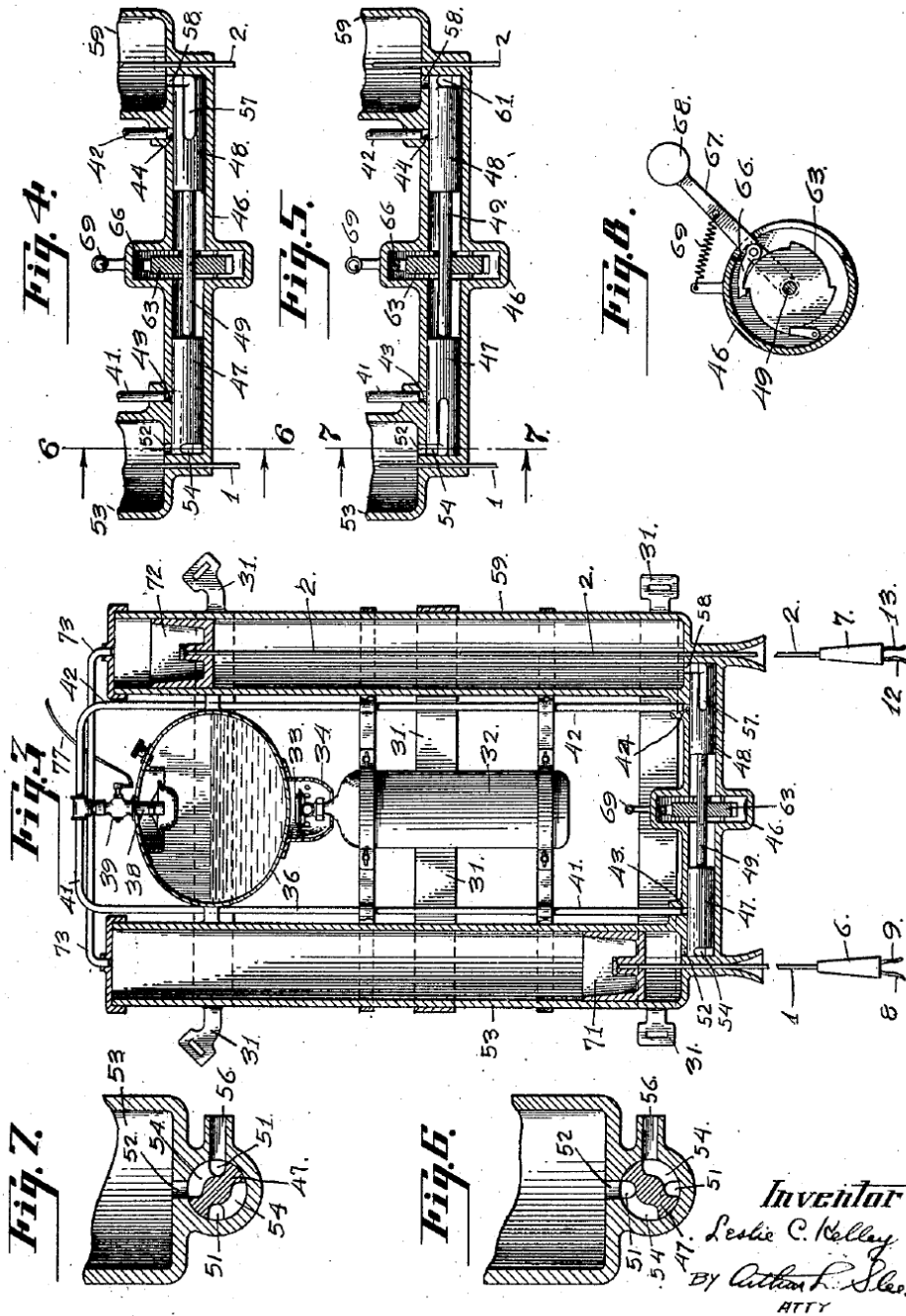
Figura 11 Ilustración del “Pedomotor” de Leslie C. Kelley, patente US1308675 [7]

L. C. KELLEY.
 PEDOMOTOR.

APPLICATION FILED APR. 24, 1917. RENEWED MAY 6, 1919.

1,308,675.

Patented July 1, 1919.
 2 SHEETS—SHEET 2.



Inventor
 Leslie C. Kelley
 BY Arthur P. Slee
 ATT'Y

Figura 12 Ilustración del sistema de vapor que alimentaba el "Pedomotor" de Leslie C. Kelley [7]

Con el tiempo estos sistemas de exoesqueletos han pasado varias iteraciones, desde sistemas hidráulicos y eléctricos que requerían estar físicamente conectado a una fuente de alimentación fija, hasta sistemas con fuentes de alimentación portátil que permite varias horas de uso.

Esta rama de exoesqueletos recibió una gran cantidad de financiación gracias a subvenciones estratégicas de la DARPA (Defense Advance Resarch Projects Agency) de los Estados Unidos de América, razón por la cual los primeros prototipos desarrollados tenían como cliente final distintas ramas del ejército y se presentaban como una solución para los grandes esfuerzos requeridos de un militar en una zona de conflicto bélico.

Un ejemplo de ello es la empresa estadounidense Sarcos, que entro en cooperación con la empresa de defensa Raytheon para el desarrollo de estas tecnologías como se puede observar en la , aunque también hay casos como la competidora de Raytheon Lockheed Martin que desarrollo también soluciones propias.



Figura 13 Modelos de los exoesqueletos XOS 2 de Raytheon y Sarcos para uso militar en 2011 [8]

Por ejemplo el modelo militar XOS 2 intenta poner remedio a las lesiones que pueden resultar de levantar de media 7300Kg de equipamiento de forma diaria.

Mediante un sistema hidráulico, una serie de válvulas inteligentes y sensores permiten coordinarse para reproducir los movimientos de una persona y al mismo tiempo proporcionar suficiente fuerza como para soportar 25Kg adicionales de peso sobre el extremo de un brazo totalmente extendido. El peso total del sistema ronda unos 68, pero su distribución hace que el propio sistema soporte ese peso, en vez de la persona [8].

Sarcos más recientemente también ha lanzado una gama de carácter industrial de sus exoesqueletos, la gama Guardian XO como se puede ver en la Figura 14.



Figura 14 Guardian XO de Sarcos para su uso en Industria

Estas versiones de sus exoesqueletos están algo más refinadas,, ya que son el resultado de casi 20 años de investigación y más de 300 millones de dólares invertidos en robótica. Algunas de sus mejoras [9], [10] más destacadas son:

- Sistemas de mejora de eficiencia para un consumo medio de 500W durante el pico de trabajo (carga de 90 Kg de peso en el sistema y desplazándose a una velocidad de 5 Km/h)
- Inclusión de movimientos regenerativos para recuperar parte de la energía en movimientos como depositar una carga en el suelo.
- Sistema con paquete baterías intercambiables que dan una autonomía de 2 horas de uso normal
- Mejora de la carga puntual que se puede levantar, el par pico que puede proporcionar las extremidades del Guardian XO son unos 450 Newtons- metro
- Mejora en la seguridad, sensores de hombre muerto en las extremidades, sistema de bloqueo para cuando se requiere usar los brazos sin la asistencia del exoesqueleto o en caso de pérdida de energía, celda de seguridad que protege a la persona en el interior en caso de caída o vuelco.
- Posibilidad de añadir accesorios de agarre personalizados y otros periféricos como soporte para móviles u otros sistemas de comunicación con sistemas industriales

Hay que tener en cuenta que estos exoesqueletos son de lo mejor que hay en el mercado, y tienen un precio para reflejarlo.

Actualmente el alquiler de un Guardian XO durante un año ronda en el 2023 a unos 100.000 dólares (90.797,44 €)

Capítulo 3 ANÁLISIS TEÓRICO DEL DISEÑO

3.1 Anatomía humana

El sistema motriz en el cuerpo humano se compone en su mayoría de huesos, músculos, tendones, articulaciones y otros tipos de tejidos.

La geometría de nuestras articulaciones, y cómo están dispuestas y conectadas, definen los tipos de movimiento que podemos ejecutar. Los movimientos son generados por músculos que producen dichas fuerzas. Cuando los músculos se contraen, tiran y como están conectados a los huesos a través de los tendones producen una serie de movimientos que permiten acercar distintos grupos de huesos entre ellos, es importante tener en cuenta que los músculos solo realizan su actividad tensados y relajándose, ya que un musculo no tiene por norma ejercer fuerza “empujando” los huesos, de querer tener un movimiento de sentido opuesto será necesario otro grupo de músculos realicen esa tarea como se puede observar en diagrama de la Figura 15.

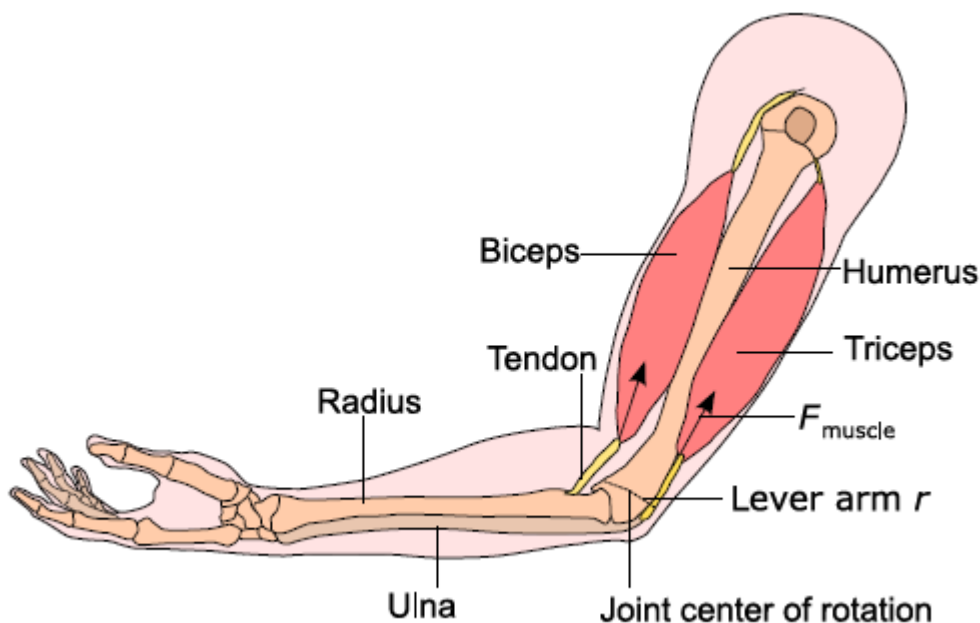


Figura 15 Diagrama simplificado del movimiento del codo en la anatomía humana [11]

Aplicándolo al caso que nos interesa, que es el de un codo, hay que tener en cuenta la función de la articulación en el codo, cómo funciona la distribución de fuerzas y otras limitaciones.

3.1.1 Músculos

En la zona del codo pasan unos 4 músculos:

- Bíceps Brachii: Encargado de la flexión y parte de la supinación del brazo
- Coracobrachialis: Flexión del brazo en el hombro
- Braquial (Brachialis): Localizado en el codo también está encargado junto con el bíceps de la flexión del codo (realiza un 50% del esfuerzo)
- Tríceps Brachii: Localizado en el reverso del brazo, se encarga de la extensión del brazo

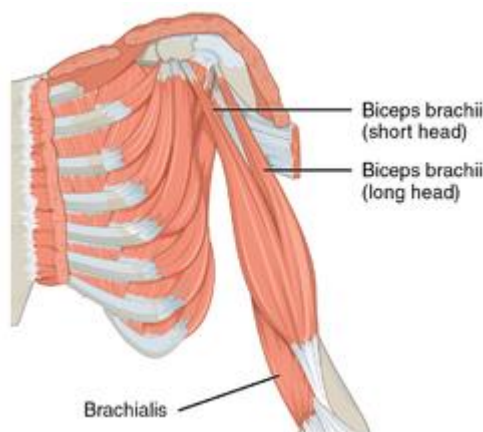


Figura 16 Posicionamiento del Bíceps y el Braquial (Wikimedia Commons)

Por lo general las fibras musculares con junto a los huesos son los eslabones más fuertes del codo junto con los huesos y las lesiones debidas a desgarros son poco comunes.

3.1.2 Ligamentos y tendones

En estos elementos es de donde derivan la mayoría de las lesiones relacionadas con el codo como se puede observar en la Figura 17 estos elementos se concentran alrededor del codo y permiten tanto el correcto movimiento del codo, como la protección de algunos de sus elementos [12].

La mayoría de las lesiones están relacionadas con el desgaste por uso repetido:

- La capsula de la articulación es la encargada de reducir las fricciones en la zona de contacto del hueso además de estar rodeada de ligamentos
- Los tendones por otro lado son el eslabón más débil ya que se encargan de conectar los huesos y los músculos, recibiendo a menudo pequeños daños acumulativos que lo debilitan cuanto mayor sea un esfuerzo y se repita este en el tiempo.

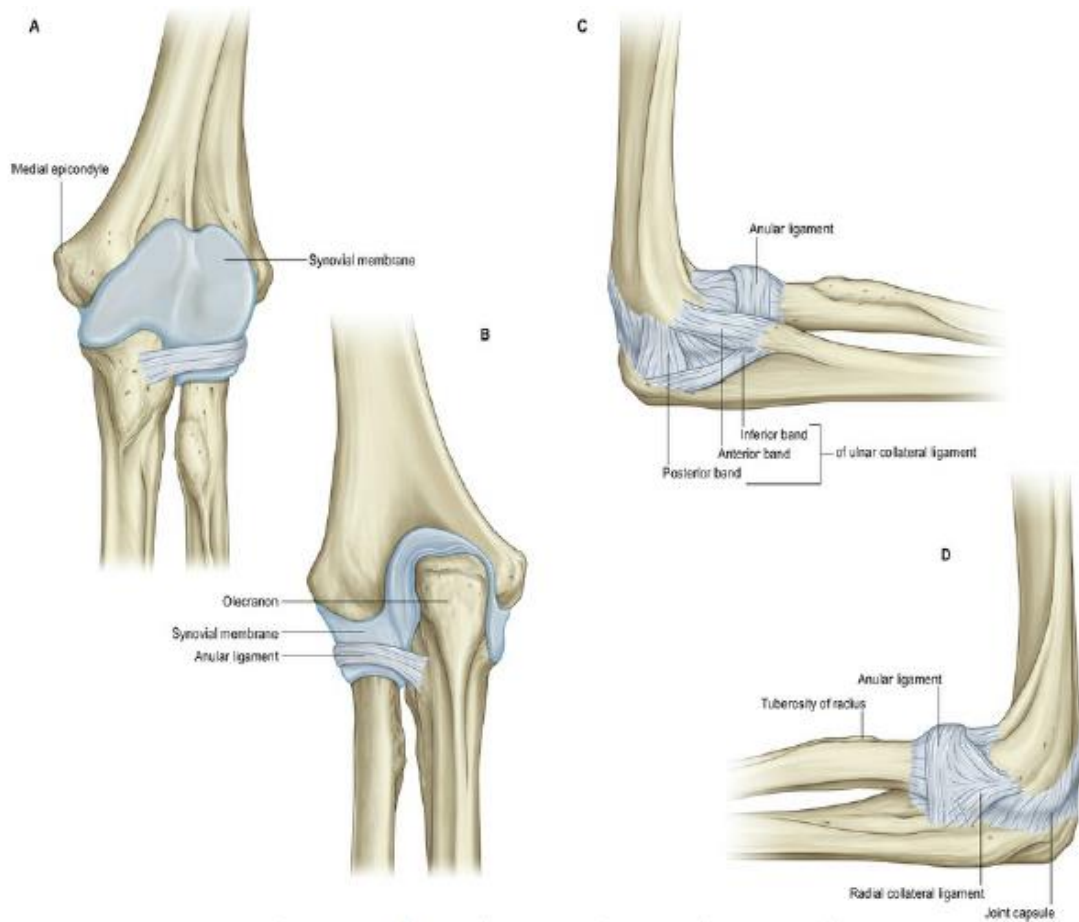


Figura 17 Ilustración de los ligamentos en el codo y como mantiene el codo unido [12]

3.1.3 Lesiones y enfermedades laborales

El Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) recoge el tipo adversos en los trabajadores en forma de enfermedades, lesiones y degeneración de ciertas partes y sistemas del cuerpo humano.

La realización de tarea con movimientos repetitivos con un nivel diverso de cargas y esfuerzos tiene como consecuencia que se puedan desarrollar a largo plazo trastornos musculoesqueléticos y son una de las principales causas de enfermedades y lesiones de origen laboral [13].

En países con una gran industria de la restauración y hostelería está muy extendido algunas de estas enfermedades y lesiones, que en ocasiones no hay concienciación

sobre que este tipo de actividades resulta en una degeneración acelerada de los músculos, articulaciones, tendones y huesos del trabajador.

En el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo se dan una serie de recomendaciones como no trabajar con los brazos en altura, realizar descansos tras un número de horas trabajando o después de realizar grandes esfuerzos para reducir el impacto de estas actividades, pero el uso de equipamiento para proteger contra el desarrollo de enfermedades esta poco extendido comparado con otros sectores y si los trabajadores usan equipos de apoyo para reforzar zonas de desgaste habitual (codos, muñecas, espalda, etc.) suele ser por iniciativa propia, más que por la implantación de un plan de prevención en los lugares de trabajo [14].

3.2 Principios mecánicos

En este apartado se hará una introducción general de la mayoría de los conceptos, leyes y fenómenos que afectaran al sistema que se quiere desarrollar.

3.2.1 Fuerza y Leyes de newton

En este apartado mencionaremos una introducción a las fuerzas y como interactúan con la masa.

La Fuerza se define como la influencia que puede generar un objeto para realizar forzar un movimiento o influencia sobre otro objeto. Pueden ser clasificadas en 2 tipos:

- Fuerzas de contacto: Los 2 objetos por empuje o tensión tienen contacto o un elemento conectando a los 2, como podría ser el rozamiento de una superficie o una cuerda.
- Fuerzas a distancia: Son fuerzas de acción a distancia y se producen por la mera presencia del objeto en la cercanía del segundo objeto, como la fuerza gravitacional, magnética o eléctrica

La Primera Ley de Newton menciona como un objeto en reposo se mantendrá en reposos siempre que no actúe sobre él una fuerza externa que provoque ese cambio. Del mismo modo un objeto en movimiento seguirá en movimiento hasta que una fuerza externa y de sentido contrario actúe sobre el ralentizándolo.

La fuerza que actúa sobre el objeto puede ser única o combinada, al fin y al acabo un conjunto de fuerzas al ser sumadas vectorialmente acabaran equivaliendo en una fuerza resultante cuya unidad internacional es el Newton (N).

$$\vec{F}_{Total} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N$$

Por otro lado el objeto suele estar definido como una masa, que por definición se resisten intrínsecamente a ser acelerados/desacelerados y cuya unidad de medida internacional es el kilogramo (kg)

La Segunda Ley de Newton establece que la aceleración de un cuerpo es proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él, e inversamente proporcional a su masa. Quedando que la fuerza se puede expresar como la energía necesaria para acelerar una cantidad de masa (m).

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{Neta}}{masa} \quad , \quad \vec{F}_{Neta} = masa * \vec{a} \quad , \quad N = kg * \frac{m}{s^2}$$

De estas ecuaciones también derivan la relación de las masas con el peso de las mismas, en este caso la aceleración está relacionada con la aceleración gravitatoria y esta varía dependiendo de en qué lugar estemos en el planeta tierra o fuera de él. Por convenio es común redondear en la aceleración gravitatoria a $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ para la superficie de nuestro planeta, puesto que alejarnos a la altura a la que se encuentra el nivel del mar hace disminuir la aceleración gravitacional, mientras que acercarnos la hace aumentar.

$$Peso = masa * g$$

La Tercera Ley de Newton declara que las fuerzas siempre actúan por pares iguales y de sentido opuesto. En otras palabras por cada acción hay una reacción en sentido opuesto.

$$\vec{F}_{BA} = -\vec{F}_{AB}$$

Que es el Momento/Par

El momento de fuerza, también conocido como torque en el mundo anglosajón, es una magnitud vectorial de la fuerza cuando esta se aplica sobre un sistema con un centro o punto de giro que actúe como el apoyo de una palanca o bisagra. Comúnmente se refiere como Momento o Par (M) y depende de la fuerza ejercida, su dirección, sentido y el punto de aplicación como se ve en la Figura 18.

$$M = \vec{OP} * F$$

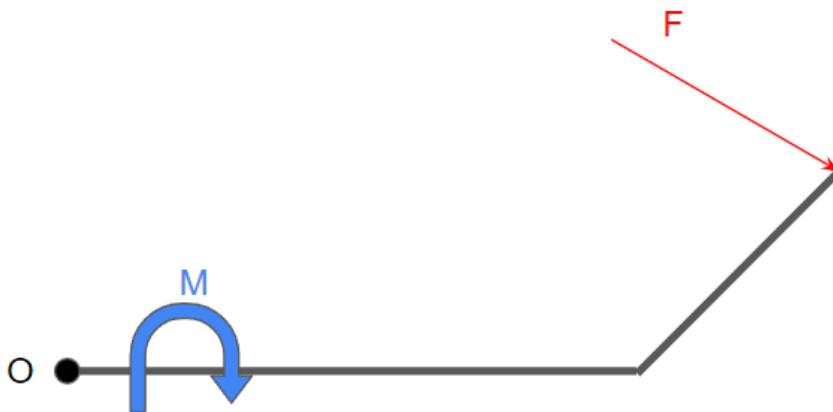


Figura 18 Boceto del momento aplicado sobre una barra o bisagra con centro de giro (estudios propios)

Hay que tener en cuenta que el punto de aplicación de la fuerza es importante, por ejemplo en un sistema planar el ángulo determinara cuanta de la fuerza es aprovechada y generara un momento, esto se debe a que solamente la fuerza que tiene una orientación perpendicular a la barra del punto de referencia que escojamos para el momento.

$$M = F_{util} = F * \text{sen } a$$

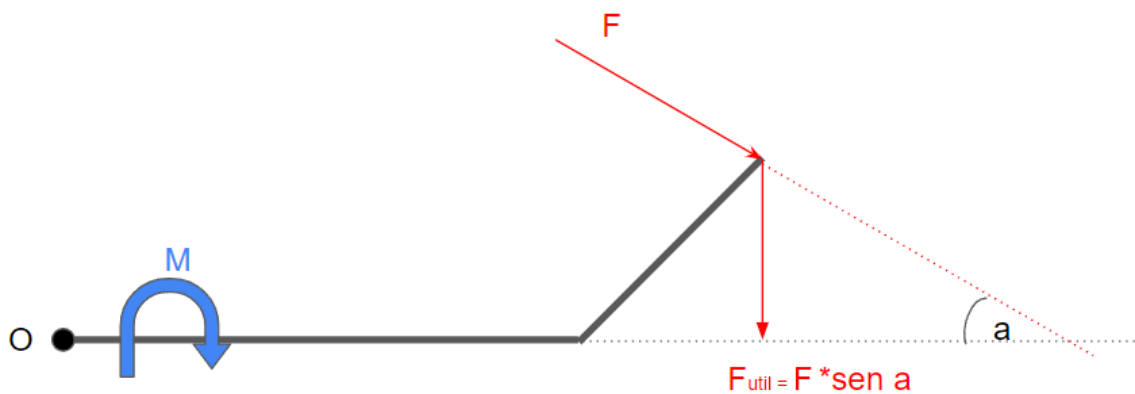


Figura 19 Boceto distribución de fuerzas para el momento (estudios propios)

Además todo ello será relativo al centro de giro para tener en cuenta la longitud (r).

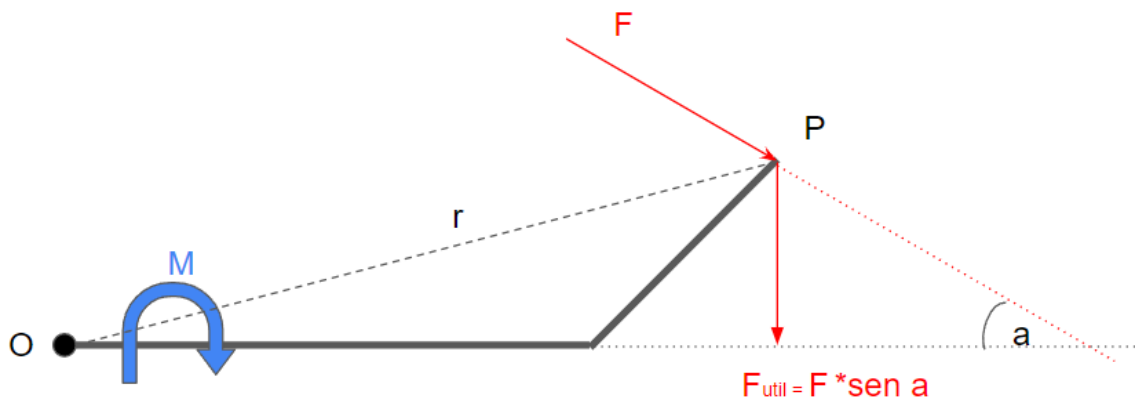


Figura 20 Boceto distancia del centro al punto de aplicación de la fuerza para el momento (estudios propios)

La unidad de medida internacional del momento es el Newton metro ($N * m$) aunque también es común que se use las unidades de ($kg * cm$) para aplicaciones de menor tamaño

3.2.2 Ratio de reducción transmisión de potencia

Más allá de los sistemas de palanca y más enfocado a los sistemas rotativos, existen una serie de mecanismo que permite aumentar el par que genera un sistema a cambio una disminución de la velocidad.

Estos se denominan sistemas de transmisión de potencia.

La potencia (P) de un sistema medida en vatios (W) viene dado por la relación del momento (M) con la velocidad angular (ω) medida en radianes por segundo ($\frac{rad}{s}$) de un sistema. De esta forma para una potencia constante en un sistema es posible conseguir un aumento en el par o velocidad angular de salida si se modifica uno de los 2 valores.

$$P = M * \omega$$

Al equilibrar estos valores es posible mover el punto de equilibrio de un sistema de transmisión de potencia para que las curvas de Potencia y Par máximo se ajusten a nuestras necesidades dependiendo de las velocidades como se ve en el siguiente la Figura 21.

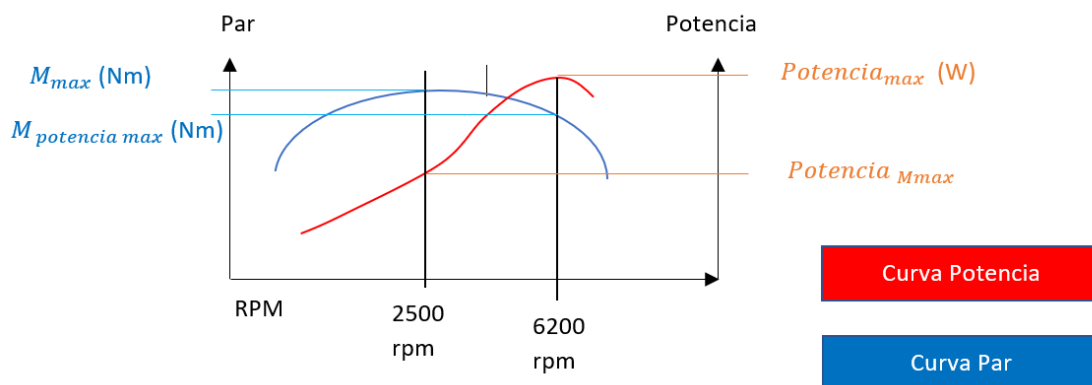


Figura 21 Grafica ilustrativa de como las curvas de Par y Potencia máximos evolucionan según las revoluciones por minuto de un motor de combustión (estudios propios)

Estos sistemas de transmisión de potencia pueden venir en forma de:

- Sistema de poleas / correas
- Sistema de engranajes
- Engranajes de onda o Harmonic

A continuación se dará una breve explicación de cada uno de ellos

3.2.2.1 Sistemas de poleas / correas

Normalmente está definido por un par o más de ruedas con una zona de contacto o con marcas sobre las que se agarra una cuerda o correa para transmitir la potencia en un sistema de transmisión.

Las variaciones de mayor o menor transmisión se consiguen ajustando los radios de las ruedas sobre las que pasan las correas, de esta forma se puede sacrificar velocidad angular a cambio de un mayor par transmitido.

Son transmisiones de potencia con elementos flexibles que permiten desarrollar sistemas de transmisión medias y largas distancias.

Los diseños de transmisión de potencia con ellos son sencillos y baratos que no requieren de un mínimo de mantenimiento como mucho la sustitución de sus componentes al final de su ciclo de vida.

Cuentan con ventajas de amortiguación tanto de impactos derivados picos de esfuerzo o trabajo repentinos al igual que de vibraciones, los que les otorga la cualidad de ser bastante silenciosos.

Existen además variedades de correas según las necesidades que requiere el sistema en lo que a su perfil, agarre, distancia a cubrir o la necesidad de uniones como se ve en la Figura 22.

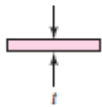


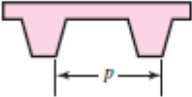
Tipo de banda	Figura	Unión	Intervalo de tamaños	Distancia entre centros
Plana		Sí	$t = \begin{cases} 0.03 \text{ a } 0.20 \text{ pulg} \\ 0.75 \text{ a } 5 \text{ mm} \end{cases}$	No hay límite superior
Redonda		Sí	$d = \frac{1}{8} \text{ a } \frac{3}{4} \text{ pulg}$	No hay límite superior
Tipo V		Ninguna	$b = \begin{cases} 0.31 \text{ a } 0.91 \text{ pulg} \\ 8 \text{ a } 19 \text{ mm} \end{cases}$	Limitada
De sincronización		Ninguna	$p = 2 \text{ mm y mayor}$	Limitada

Figura 22 Tabla comparativa de algunos tipos comunes de bandas/correas [15]

Por otro lado tienen problemas en la capacidad de potencia que pueden transmitir, ya que se arriesga a producirse momentos en los que las correas deslicen debido a altos picos de potencia o en el caso de un desgaste prolongado.

También pueden tener problemas de precisión y requieren de un reajuste en la tensión de las mismas para mantener un mínimo de precisión y evitar también la posibilidad de reducir el área de contacto de la correa

Para algunos de estos problemas hay variedades de los sistemas que usan cadenas en vez de una correa, debido que son más seguras y precisas al eliminar la posibilidad de deslizarse sobre la zona de contacto, dan más precisión debido a zonas de contacto para los eslabones y permiten mayores cargas debido a la mayor resistencia del material.

3.2.2.2 Sistemas de engranajes

Mediante el uso de varios engranajes implementados dentro de un reductor se puede obtener una variación de la velocidad angular y par transmitido a un sistema.

Al ser fabricados con materiales más resistentes, esto permite soportar pares muy altos sin perder precisión o tener pérdidas de potencia como el que puede venir dado por deslizamientos en una correa.

Son muy versátiles a la hora de posicionarse, permitiendo cambios de transmisión de par con relativa facilidad como se puede ver en la Figura 23.

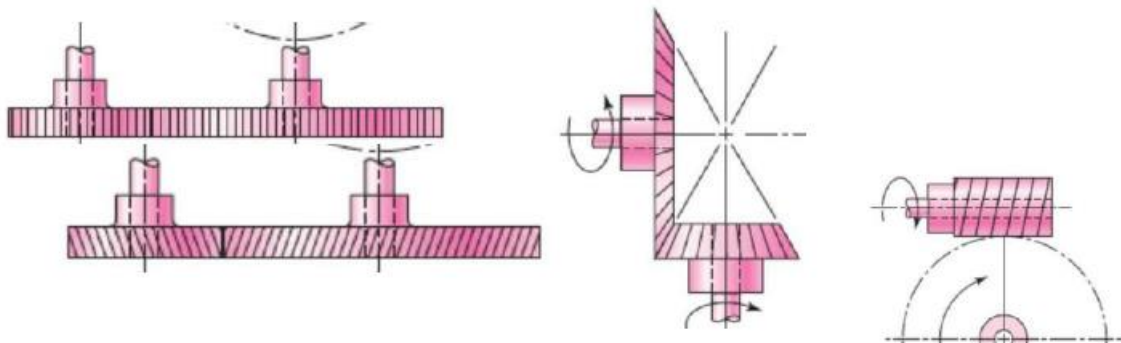


Figura 23 Conexiones y cambios de direcciones posibles con un sistema de engranajes [15]

Además ayuda que haya una gran variedad de tipos de engranajes, cada uno con sus ventajas y desventajas para cada situación:

- Engranajes rectos
- Engranajes cónicos
- Engranajes helicoidales
- Engranajes para tornillo sin fin

Los sistemas de engranajes aparecen de 2 formas:

Como tren de engranajes, que conecta varios pares de engranajes para sacarle el máximo partido a su ratio de reducción usando la relación entre el número de dientes entre pares de engranajes como se muestra en la Figura 24.

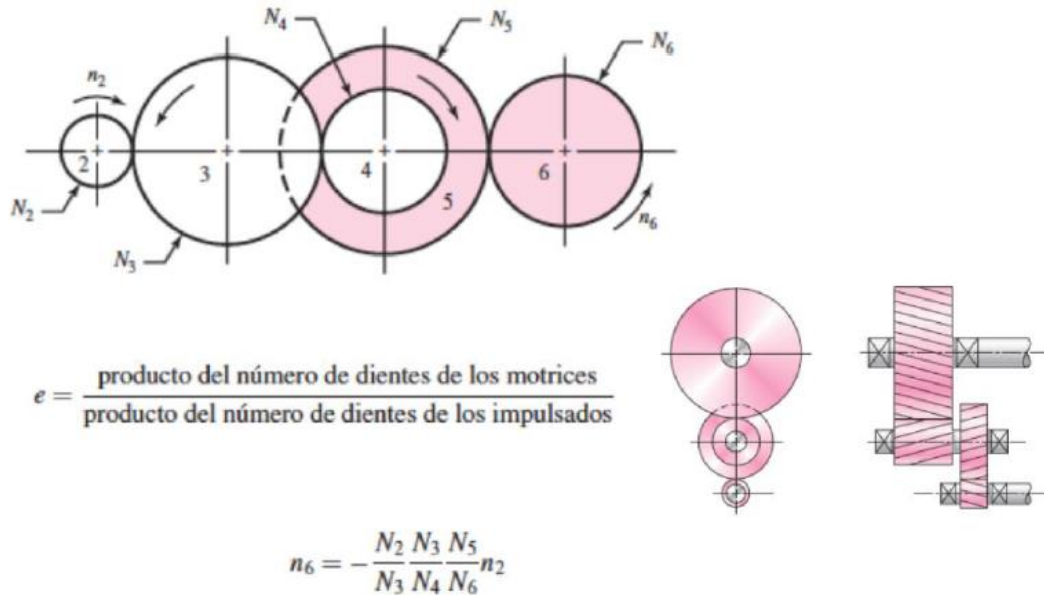


Figura 24 relación de reducción en un tren de engranajes [15]

O por otro lado se pueden plantear como una reductora de engranajes planetarios. Se llama así por el hecho de que algunos de los engranajes (engranajes planeta) orbitan alrededor de otros engranajes (engranajes sol) conectados por un brazo (portasatelites) y quedando estos conectados a una corona, de esta forma hay un ratio de reducción entre engranajes y el brazo que conecta al engranaje que orbita actúa como si de otro engranaje más se tratase como se aprecia en la Figura 25.

Estos sistemas de una densidad de reducción mucho mayor a los trenes de engranajes comunes gracias a la posibilidad de llevar varios ciclos de reducción en el mismo nivel en el que hay un sistema planetario, además de permitir algo más de estabilidad al distribuir la masa dentro del sistemas y la carga entre varios engranajes planetarios rotando sobre la corona.

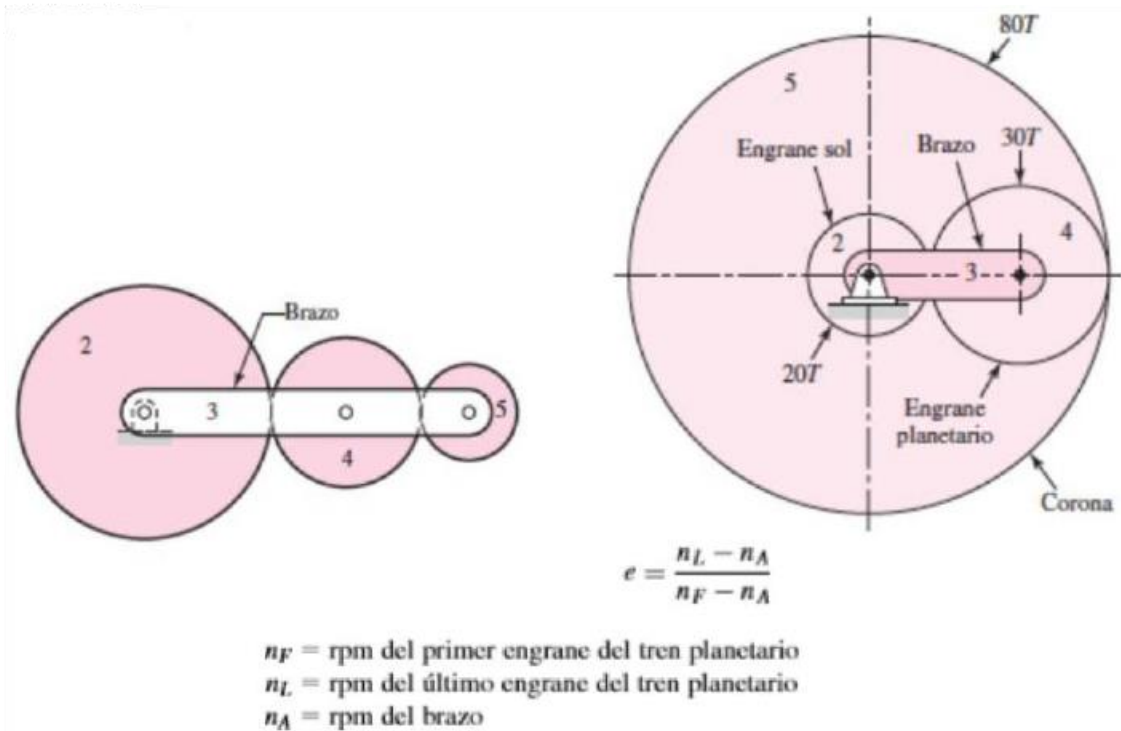


Figura 25 Partes y relación de un sistema de engranajes planetarios [15]

Hay que mencionar que los sistemas de engranajes tienen algunas desventajas, la mayoría relacionadas con la complejidad de su diseño. Esto los hace muy susceptibles a las condiciones en las que trabajan y requieren de lubricación y ambientes limpios que no permitan la entrada de elementos dentro del sistema.

Otra desventaja sería que aunque permitan altas densidades energéticas consiguiendo reductoras y transmisiones de potencia muy pequeñas para los pares que transmite, cuando se trata de largas distancias tienden a funcionar bastante mal ya que las transmisiones como engranajes funcionan peor a esas distancias requiriendo mucho material y la optativa suele pasar por ejes de transmisión que requieren de estabilización y soportes a lo largo del camino a donde se quiera transmitir la potencia.

Por último es común el oír vibraciones y ruidos derivados de sistemas de engranajes girando a altas revoluciones, por lo que es necesario a la hora de tener en cuenta de escoger el tipo de engranajes y su velocidad de operación.

3.2.2.3 Engranajes de onda o Harmonic

También conocido como Harmonic Drive o Strain Wave Gearing System en inglés, es un tipo de sistema de engranaje mecánico que utiliza un generador de onda en forma de elipse para deformar una corona flexible de dientes exteriores para que esta encaje en una corona exterior fija de dientes interiores.

La deformación de la corona interior permite la rotación al causar que sus dientes se desplacen una posición en la corona exterior al pasar el generador de onda de esta forma se puede desplazar 2 dientes de engranaje por revolución por ejemplo se puede ver en la Figura 26 .

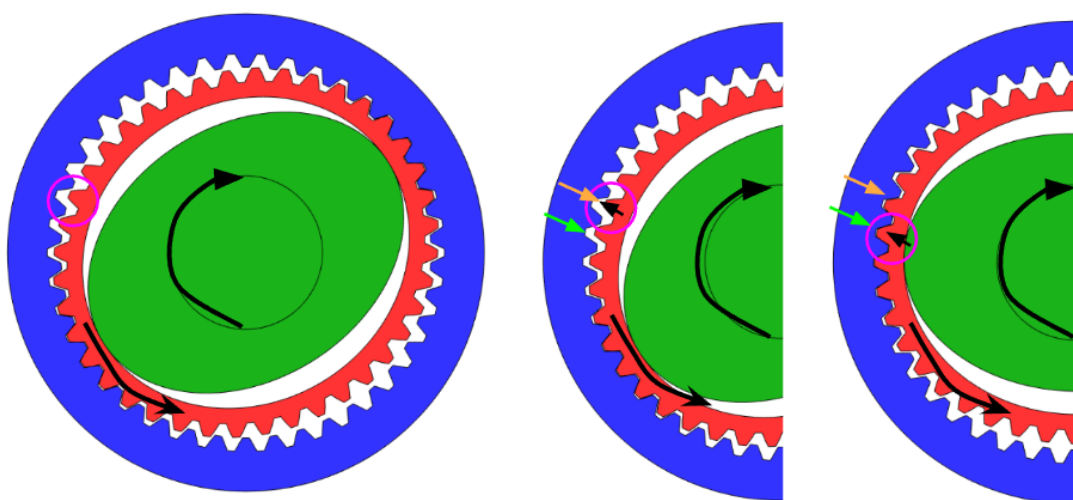


Figura 26 Desplazamiento de los dientes al deformarse la corona (estudios propios & [16])

Este tipo de sistemas son de lo más compactos y ligeros que existen, otorgando altos ratios de reducción en un perfil muy pequeño. En un espacio donde un engranaje planetario conseguiría una reducción de 10:1 un engranaje Harmonic, puede conseguir un rango de entre 30:1 hasta 320:1 dependiendo de la distribución y relación de los engranajes.

$$\text{Ratio reducción} = \frac{n^{\circ} \text{ dientes corona flex} - n^{\circ} \text{ dientes corona exterior}}{n^{\circ} \text{ dientes corona flex}}$$

Sin embargo hay que tener en cuenta que esto significa que el ratio de reducción genera un movimiento de sentido opuesto al generador de ondas, por ejemplo para una corona exterior de 202 dientes y una corona flexible de 200 dientes

$$\text{Ratio reducción} = \frac{200 - 202}{200} = -\frac{2}{200} = -0.01$$

Obtenemos una reducción de 100 en dirección opuesta

El sistema también es muy silencioso comparado con otros sistemas de engranajes, debido en parte a los materiales flexibles y a la forma en la que los engranajes de las coronas hacen contacto entre sí.

Los Engranajes Harmonic ofrecen un alto grado de precisión con poco backlash, lo cual los hace una opción común en sectores que requieren reductores pequeños y altos pares.

Por otro lado el mantenimiento e instalación es algo más complicado y de no realizarse correctamente es posible que no funcione de la forma prevista, esto unido a un coste superior a los otros sistemas de transmisión de potencia hace que su uso sea más extendido.

3.3 Componentes almacenadores de energía mecánica

3.3.1 Introducción a Muelles y resortes elásticos

Se llaman muelles y resortes elásticos una serie de mecanismos los cuales sufren de una deformación elástica cuando son sujetos a fuerzas en la dirección y sentido para los que están diseñados.

Al sufrir esta deformación elástica, estos mecanismo actúan como almacenadores de energía mecánica y cuando esta deformación es revertida, devuelven la energía en forma de una fuerza de misma dirección pero sentido opuesto a la fuerza original.

Las fuerzas que devuelven estos muelles vienen dadas por la ley de Hooke, la cual relaciona la longitud que se ha extendido/contraído un muelle y la k , constante propia de cada muelle para almacenar energía, para hallar la fuerza de sentido opuesto a la longitud extendida/contraída.

$$F_x = -k * x$$

Por ejemplo en la Figura 27 se puede observar un ejemplo simplificado en una única dimensión de como en un muelle que permite tanto compresión como extensión, la fuerza siempre es de sentido contrario a la variación de longitud.

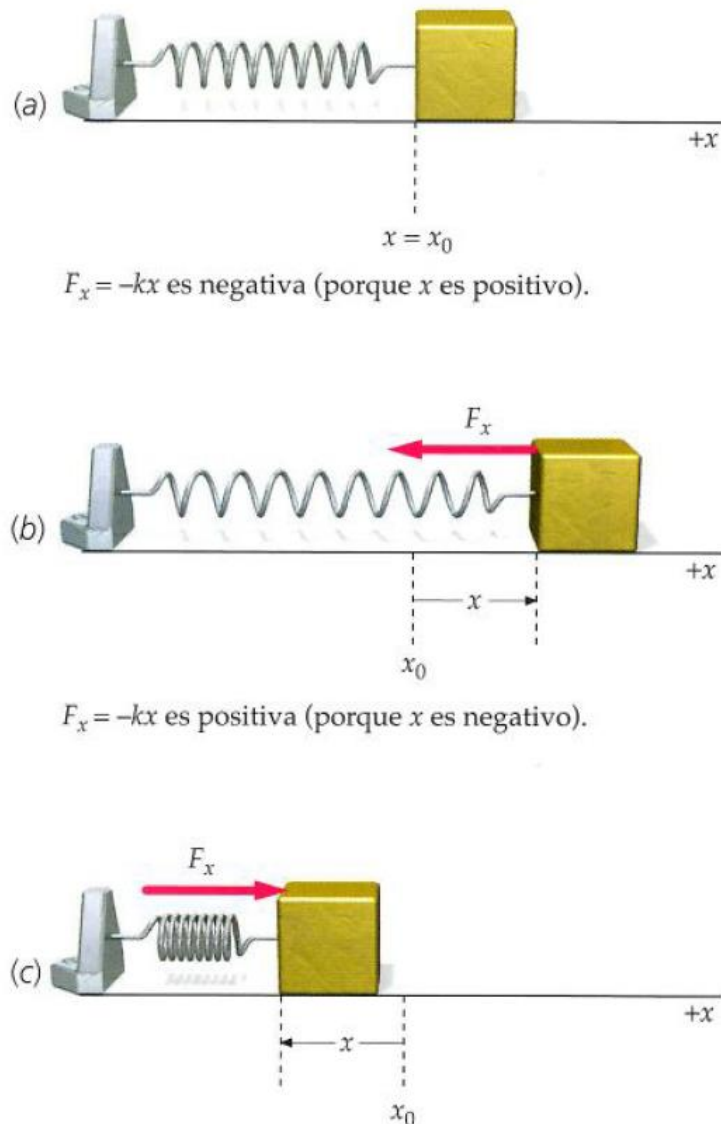


Figura 27 Diagrama comparativo de cómo actúa la ley de Hooke [17]

Por estas razones también actúan muy bien como filtros para evitar picos de fuerza, permitiendo almacenarse para equilibrar la reacción en, por ejemplo, sistemas de suspensión de todo tipo de vehículos. Aunque suelen requerir de sistemas adicionales como amortiguadores y otras estructuras que les dan rigidez y evitan fenómenos como la resonancia que evitaría disipar la energía de picos de fuerza. Esto suele ser representado como un diagrama de muelle-amortiguador, como el mostrado en la Figura 28 y es usado comúnmente en vehículos como se ve en la Figura 29.

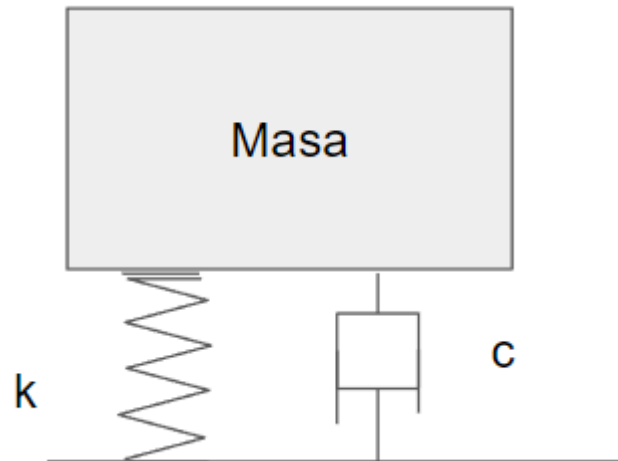


Figura 28 Diagrama de un sistema muelle amortiguador (estudios propios & [18])



Figura 29 Sistema de Muelle y amortiguador en un vehículo [19]

Estos tipos de muelles y mecanismos elásticos según su funcionamiento se pueden clasificar según su funcionamiento en:

- Tensión/compresión
- Muelles de Torsión

Mientras que por su fabricación y materiales que lo componen se pueden clasificar como:

- Muelles mecánicos
- Muelles elásticos
- Muelles hidro-neumáticos

A continuación profundizaremos un poco en cada uno de ellos

3.3.1.1 Funcionamiento de tensión y Compresión

Por lo general son diseñados para soportar fuerzas de tipo axial sobre ellas ya sean compresión o extensión. Suelen estar regidos por la ley de Hooke o la curva de deformación elástica que produce el material.

Aceptan cierta modificaciones sobre sus parámetros para tener mayor o menor resistencia a la deformación, pero uno de los principales factores que determinan sus propiedades, es el material del que están fabricados.

Además es común la necesidad de guías que mantengan la alineación, sobre todo en los muelles helicoidales diseñados para compresión, los cuales son propensos al pandeo cuando la carga es elevada

3.3.1.2 Funcionamiento de muelles de torsión

Su funcionamiento es similar a otros mecanismos elásticos, pero su funcionamiento se basa en resistencia de una espiral de un material mecánico a ser torsionado en la dirección para la que fue diseñado. El momento de torsión hace que las espiras se acerquen entre ellas y provoca que el muelle gane vueltas adicionales, de forma que cuando sea liberado de la fuerza inicial, deshará las revoluciones a las que fue sometido hasta volver a su estado inicial.

Ejemplos de aplicaciones ellos son mecanismo a los que hay que dar cuerda como relojes analógicos visto en la Figura 30 o trampas para ratones

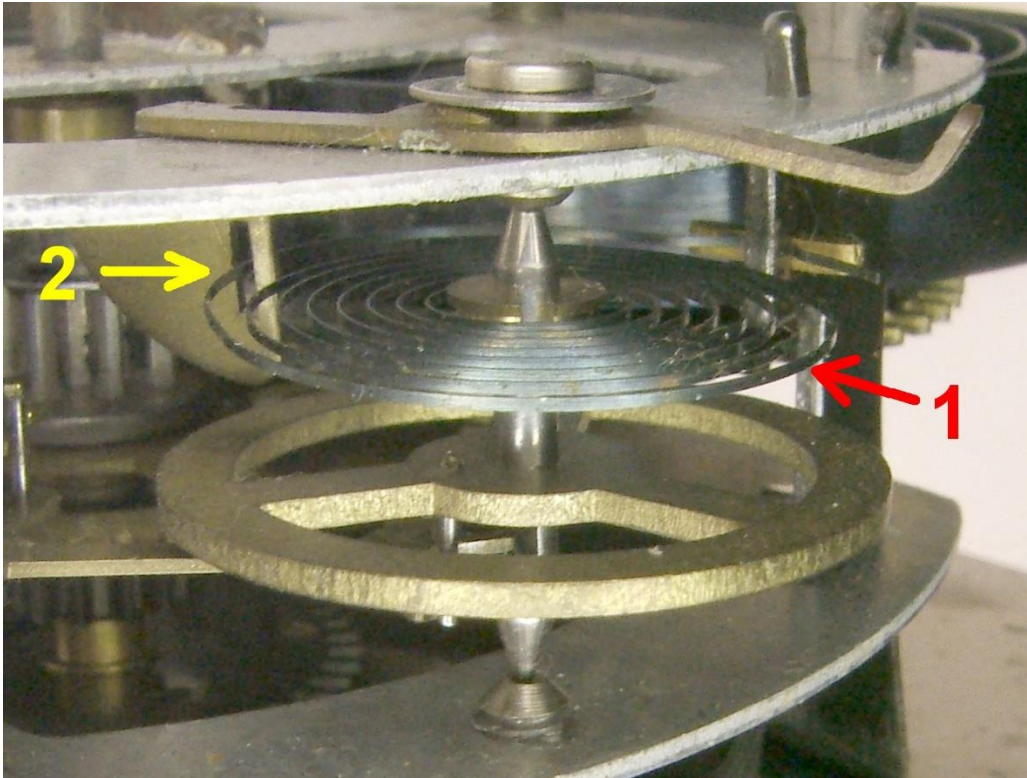


Figura 30 Muelle de torsión de un mecanismo de un reloj [20]

3.3.1.3 Muelles mecánicos

Comúnmente fabricados de algún tipo de acero o aleación metálica dependiendo de las propiedades que necesite, tienen formas de espiral o helicoidales. Son muy resistentes y duraderos, sin embargo tienden a sufrir cargas por torsión y flexión por cómo están diseñados.

Aunque los muelles más típicos son los helicoidales, también existen de voluta u otras variedades como de fuerza constante, mostrado en la Figura 31.

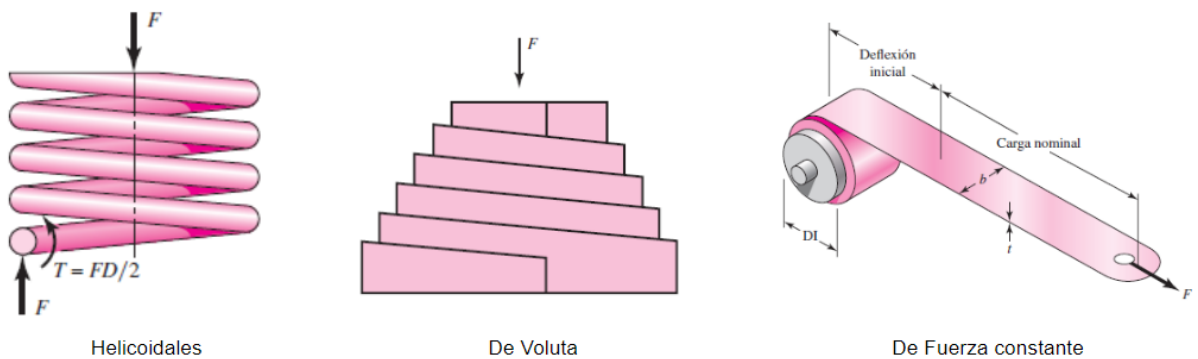


Figura 31 Ejemplos de muelles mecánicos [15]

3.3.1.4 Muelles elásticos

Por lo general tienen formas poco elaboradas, se basan en elastómeros y aprovechan las propiedades de dichos materiales para obtener un alto grado de elasticidad y por lo tanto de almacenamiento de energía. Esto junto con el hecho de su facilidad de fabricación y relativo bajo coste, los hace bastante comunes en todo tipo de aplicaciones.

Tienen limitaciones puesto que suelen funcionar mejor en tracción que en compresión, aunque con la estructura adecuada es posible usarlos en compresión o incluso torsión.

Tienen una vida limitada, ya que dependen de su curva de elasticidad y con el tiempo parte de esa deformación elástica acaba generando también deformación plástica modificando las propiedades del muelle

3.3.1.5 Muelles hidro-neumáticos

Se basan en un sistema de cilindro con pistón y de la compresión de ciertos gases para el almacenamiento de energía y de aceites para servir de amortiguador. Estos sistemas suelen aprovechar las curvas presión/temperatura/volumen de dichos gases para obtener ciertas cantidades fuerza dependiendo de la extensión del cilindro en la Figura 32 se puede observar las partes que lo componen y como varia la presión y el volumen según se extiende el cilindro.

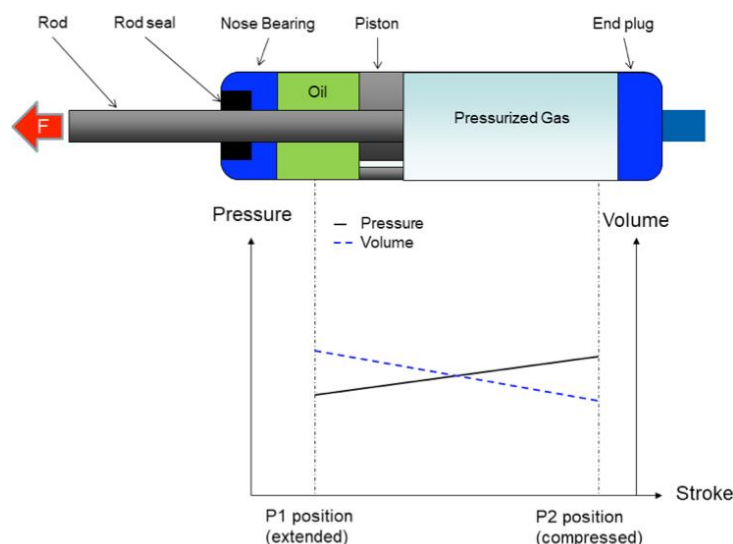


Figura 32 Diagrama e un muelle hidro-neumático [21]

3.3.2 Serial Elastic Actuators

También conocidos como SEA, son una serie de actuadores comúnmente usados en el mundo de la robótica blanda. Estos sistemas ofrecen algo más de versatilidad en el control de la fuerza ejercida por los sistemas de control donde son implementados y son populares en todo lo relacionado con la robótica colaborativa. Se considera que los SEA están formados por:

- Elementos pasivos: Como muelles, sistemas elásticos, amortiguadores y/o cilindros que se encargan de almacenar energía o evitar picos de trabajo sobre los elementos activos. También es común la adición en esta parte de mecanismos de transmisión que aumenten el Par de fuerza que pueden ejercer los elementos activos
- Elementos activos: Por lo general son los elementos que producen fuerza y trabajo en un sistema, pueden venir en forma de motores eléctricos, cilindros hidráulicos/neumáticos o incluso la fuerza aportado de forma manual por una persona que este en control del sistema.
- Sensores: Los SEA suelen requerir un mínimo de Sensorización, esto se debe a que aunque se conozca las propiedades de los distintos elementos que lo conforman (Par de los motores, k de los muelles, ratios de la transmisión, etc) también es necesario un control de la posición real de la articulación, la fuerza que está soportando el sistema ya sea lineal o como Momento, entre otras variables.

El diagrama de los componentes sin sensorizar es como el que se muestra en la Figura 33 es sencillo, pero no tendrá control de la posición y fuerza más allá de un sistema todo o nada, siendo los elementos pasivos los que dan un mínimo grado de control.

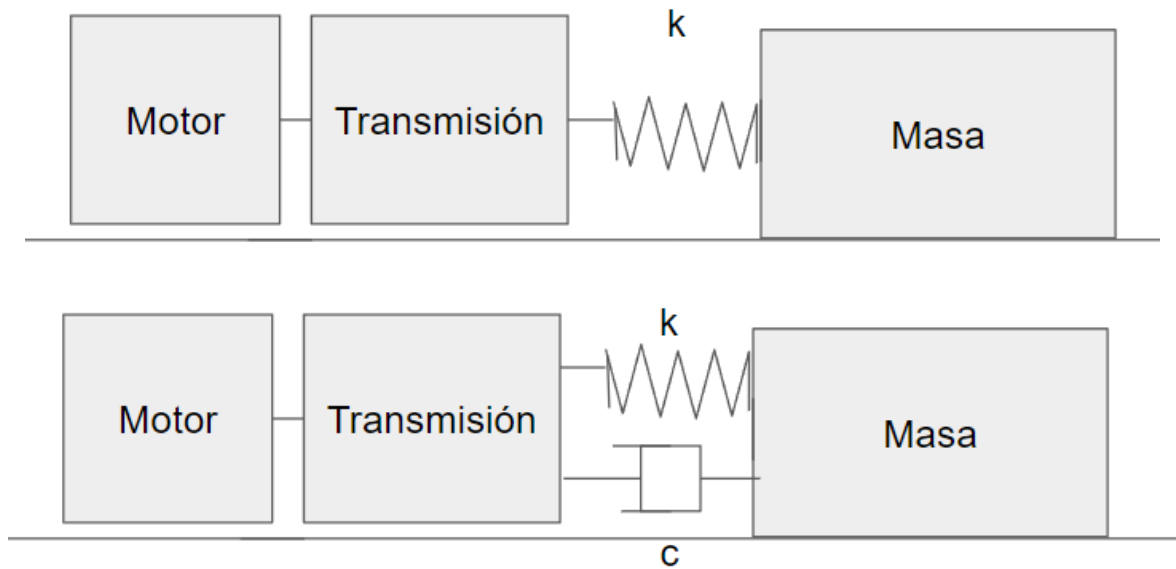


Figura 33 Diagrama de componentes de un SEA no amortiguado / amortiguado sin sensorizar (estudios propios) [22], [23]

Los SEA se rigen por ecuaciones de cuerpo libre en las cuales juega la posición de la masa y el Par aportado al sistema, teniendo el muelle como sistema intermedio [22]. De esta manera queda que:

J_j , Sería el momento de inercia del motor.

J_l , el momento de inercia de la carga a mover.

B_j , el coeficiente de amortiguamiento del motor.

B_l , el coeficiente de amortiguamiento de la carga.

θ_j , θ_l y θ_s , sería la posición de la articulación para el motor , el de la carga y el movimiento del muelle respectivamente.

$\ddot{\theta}_j$, Corresponde a la segunda derivada respecto al tiempo de la posición, mientras que $\dot{\theta}_j$ sería para la primera derivada de la posición respecto al tiempo

τ_j , corresponde al momento que genera el motor

τ_s , es el momento que se transmite por el muelle del SEA

K_s , es la constante de Hook del muelle que forma el SEA

De esta forma quedan las siguientes ecuaciones

Para el motor $J_j * \ddot{\theta}_j = \tau_j - \tau_s - B_j * \dot{\theta}_j$

Para la carga $J_l * \ddot{\theta}_l = \tau_s - B_l * \dot{\theta}_l$

Para el muelle $\tau_s = K_s * \theta_s$

Quedando una función de transferencia del momento

$$P(s) = \frac{\tau_s}{\tau_j} = \frac{K_s(J_{ls} + B_l)}{(J_{ls} + B_l) * (J_{ls^2} + B_{js}) + K_s((J_l + J_j)s + (B_l + B_j))}$$

De esta manera queda el diagrama resultante que se muestra en la Figura 34 para la articulación de una pierna

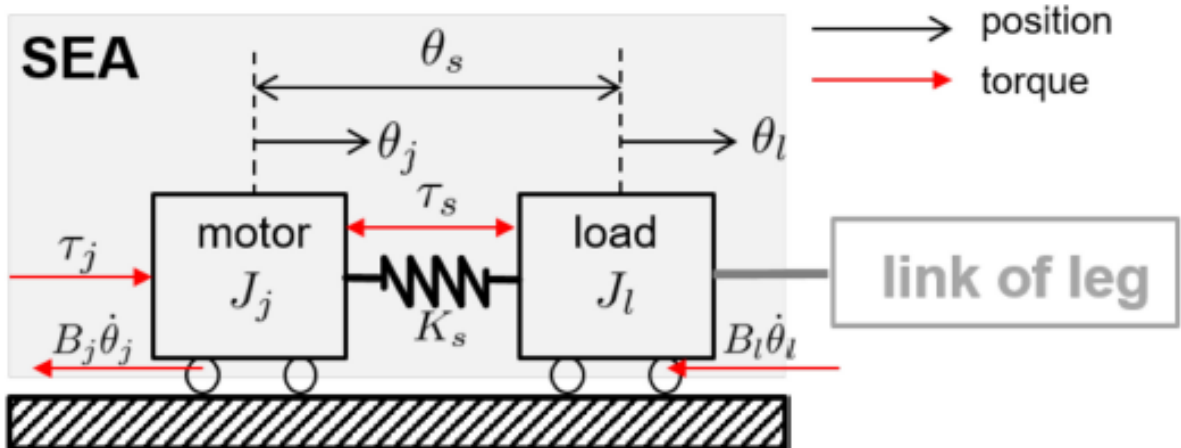


Figura 34 Diagrama de cuerpo libre de un sistema SEA y los movimiento y pares que actúan sobre ellos [22]

3.3.2.1 Tipos de SEA:

Mecánicos Lineales:

Se basan en sistemas de actuadores lineales como tornillos sin fin y muelles como elemento elástico. Su construcción no es compleja como se muestra en la Figura 35 y la Figura 36 , pero tiene los suficientes elementos como para que su control dependa de múltiples variables [23].

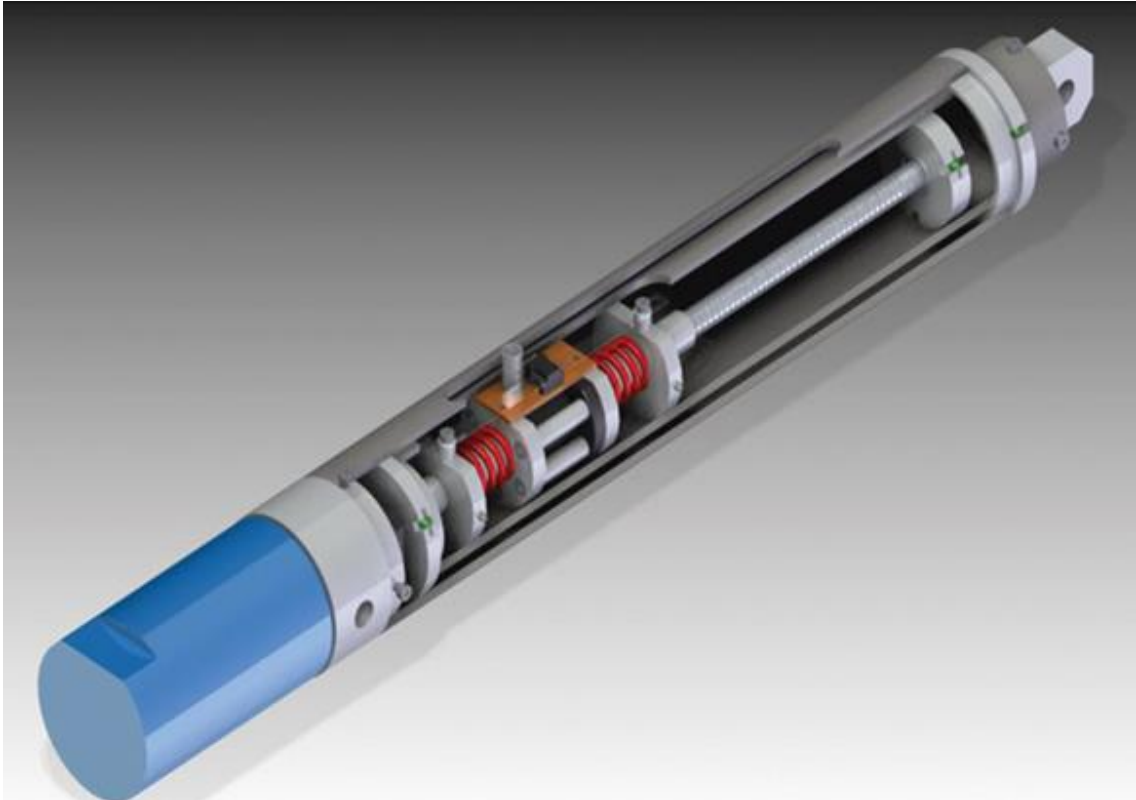


Figura 35 SEA mecánico de un sistema de tornillo sin fin con muelles,[23]

- Variables de control de fuerza/Momento: Potencia del motor, ratio de reducción del motor, paso del tornillo sin fin, influyen en la fuerza que ejerce
- Variables de estabilidad del sistema: La energía almacenada en los muelles y la amortiguación del sistema
- Pérdidas del sistema: Desde las pérdidas del motor y pérdidas de fricción, hasta la energía perdida por los muelles al recuperar su posición o la energía disipada por los amortiguadores.

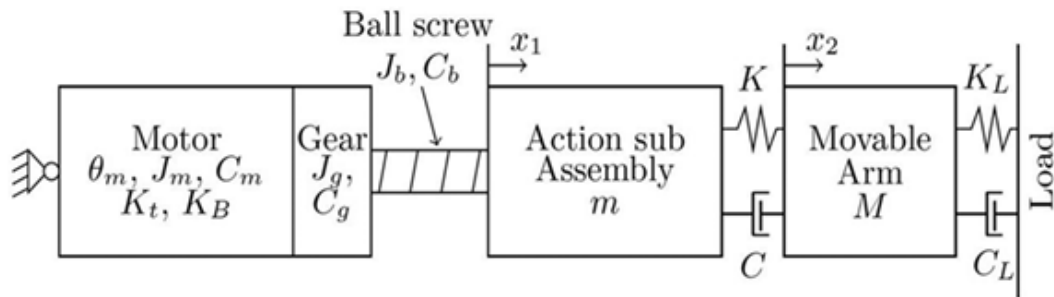


Figura 36 Diagrama de los elementos de un SEA mecánico [23]

Hidráulico:

Los SEA hidráulicos son algo más complejos al estar formados por varios cilindros concéntricos que controlan el sistema del actuador lineal y le otorgan estabilidad como se puede ver en la Figura 37 y la Figura 38.

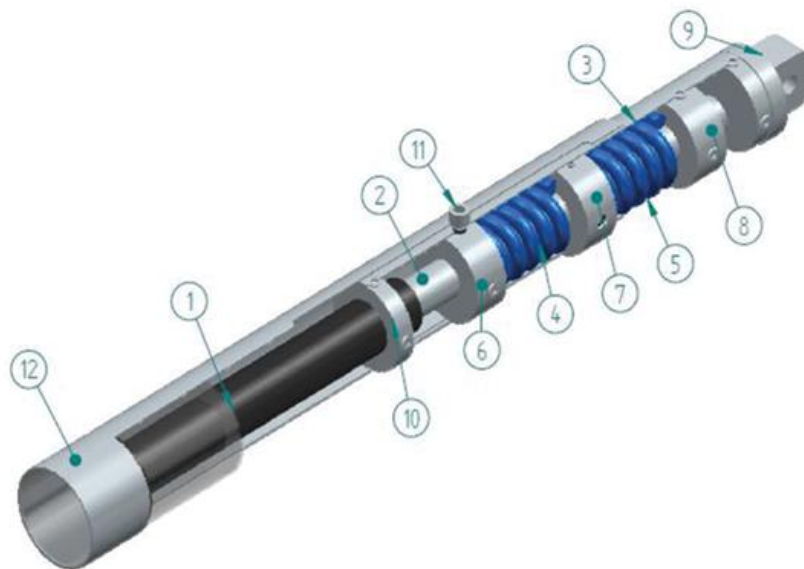


Figura 37 Sistema de un SEA hidráulico con muelles y amortiguadores [23]

Estos sistemas permiten concentrar mayor potencia si la bomba hidráulica se encuentra fuera de la zona de trabajo. Por otro lado requieren de mayor mantenimiento que los sistemas puramente mecánicos.

Las variables de control incluyen:

- Variables de control de fuerza/Momento: Potencia de la bomba hidráulica, área de los cilindros, tipo de fluido en el circuito.
- Variables de estabilidad del sistema: La energía almacenada en los muelles y la amortiguación del sistema
- Perdidas del sistema: A parte de las pérdidas de la bomba, la energía almacenada y disipada en los muelles y amortiguadores, también se le añade las fricciones de los cilindros, fluidos hidráulicos y la posibilidad de fugas que generen pérdidas adicionales.

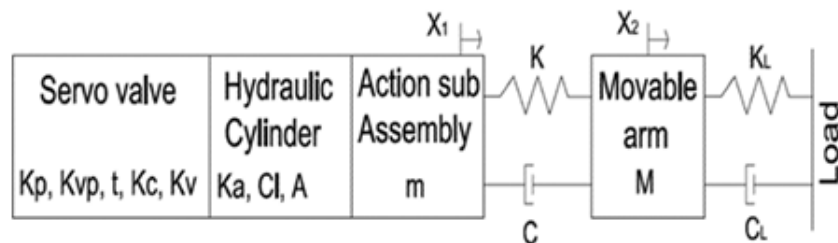


Figura 38 Diagrama de un SEA hidráulico con muelles y compresores [23]

Torsionales:

Son modelos muy compacto que juntas la mayoría de los elementos en un solo cuerpo que incluye motor, reductora y muelle de torsión como se muestra en la Figura 39.

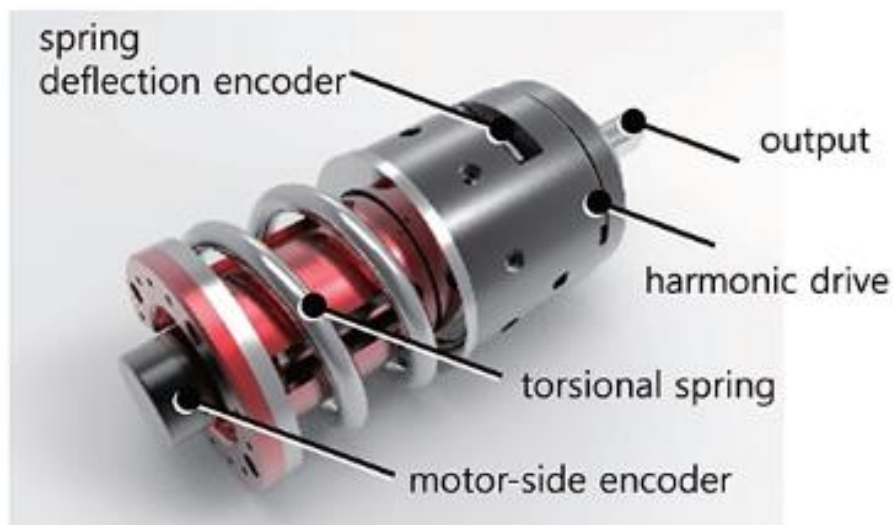


Figura 39 SEA torsional con transmisión que detecta los cambios de fuerza requeridos [22]

3.3.2.2 Ventajas y desventajas

En la robótica los sistemas SEA encuentran aplicaciones de tareas que implican interacción física con el entorno. Pueden utilizarse en brazos robóticos, exoesqueletos y prótesis de todo tipo, proporcionando un movimiento flexible y adaptable que mejora la seguridad, al permitir un rango de funcionamiento menos rígido que los controles de la robótica convencional que se suele denominar “robótica blanda” o “soft robotics”, todo ello sin sacrificar la precisión de los movimientos.

También es común el uso en sistemas de rehabilitación para grupos de músculos o incluso recuperar las funciones motrices de una gran variedad de extremidades.

Las capacidad de implementarse en sistemas que por eficiencia o por su funcionamiento se benefician de capacidades regenerativas de energía, como puede ser últimamente el desarrollo de robot cuadrúpedos y bípedos también es un área de desarrollo actual. Esto también ayuda proporcionar picos de esfuerzo adicional, al permitir precargar de energía estos sistemas elásticos, para proporcionarla a posteriori.

Por otro lado en las desventajas, estos sistemas añaden varios componentes adicionales de control a sistemas que podría ser más sencillo.

Esto significa que se incrementan los puntos donde puede fallar un sistema de control y aumenta también factores de desgaste adicional que puede suponer el sistema elástico y como su funcionamiento bajo condiciones de desgaste con el tiempo o los elementos.

También hay que tener en cuenta que los sistemas elásticos de los SEA tienen por norma producir una latencia adicional en la respuesta deseada, especialmente si se opera fuera del rango de carga para el que fue diseñado.

3.4 Sistema de Control

3.4.1 Introducción a los sistemas de control

Los sistemas de control consisten en el establecimiento de una regulación de los parámetros de un sistema en el dominio del tiempo para que se desarrollen de forma conforme a nuestras especificaciones en su respuesta en el tiempo, velocidad, precisión u cualquier otra variable que conforme el sistema [24].

Los sistemas según su control pueden ser de 2 tipos:

- **Sistemas de lazo abierto:** Se carece de una realimentación en el sistema, por lo que consisten en sistemas todo o nada con un control limitado y que puede ser afectado fácilmente por perturbaciones. Por otro lado son más sencillos de producir y menos costoso de operar al reducir la necesidad de sensores y no tienen problemas de estabilidad en su control.
- **Sistemas de lazo cerrado:** Hay un mínimo de Sensorización que permite el cálculo de desviaciones del sistema, la trayectoria que sigue he incluso es posible ajustarlo de forma dinámica para obtener una respuesta que se ajuste al control que queremos implementar sobre el sistema.

Componentes de un sistema de Regulación:

- **Regulador/Controlador:** Recoge el valor de referencia inicial y se encarga de mandar la señal de control a los actuadores
- **Actuador:** Ejecuta el control recibido por el regulador/controlador sobre el sistema
- **Sistema para controlar:** Nuestro sistema a controlar que produce unas variables controladas a su salida
- **Sensores:** Recogen información sobre las variables controladas para seguir ajustándolas y la transmite al regulador, para así proporcionar una respuesta adecuada y proporcionada a nuestro valor de referencia
- **Perturbaciones:** Son todo tipo de circunstancias y señales que pueden afectar negativamente al sistema para controlar y las variables de salida que nos interesa. Las perturbaciones pueden ser tanto internas como externas al sistema
- **Error:** Es la diferencia que se produce entre nuestro valor deseado y el valor de las variables controladas de salida, transmitir el error producido al regulador nos permite corregir ese error o aproximar lo más posible a cero

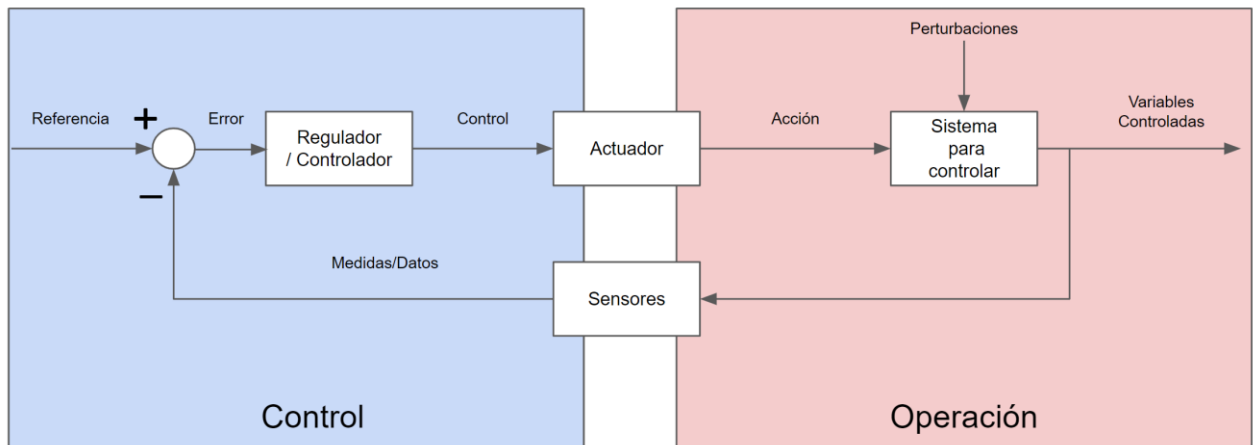


Figura 40 Diagrama de un sistema de control de lazo cerrado estandarizado (estudios propios & [24])

El diseño de sistemas de control se puede realizar de muchas maneras, desde procesos de ensayo y error ajustando una ganancia inicial y seguir refinando hasta obtener un resultado satisfactorio, hasta el uso de software de simulación y el uso de teorías de control como el lugar de las raíces o respuesta del sistema en frecuencia.

3.4.2 Controladores PID

Son sistemas de control basados en modelos matemáticos de uso de Proporcionales, Integrales y Derivativos. El diseño de PID para sistemas de control es similar a otros sistemas de control, se puede realizar de manera experimental, o mediante el uso de teorías de sintonía para el control, como la de Ziegler-Nichols [24]. Estos sistemas establecen los siguientes parámetros para formar un PID como en la FX:

- K_p : Es la ganancia de la proporcional que actúa sobre el escalón de respuesta inicial
- T_i : Es el tiempo de la integral
- T_d : Es el tiempo del derivativo

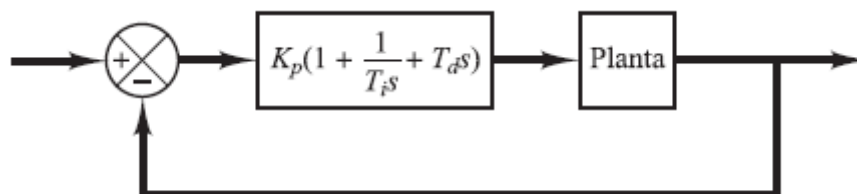


Figura 41 Sistema de control PID [24]

Las Reglas de Ziegler-Nichols, permiten hallar el PID de un sistema mediante 2 métodos:

1º Método Respuesta ante un escalón:

Este método requiere realizar una entrada experimental de un escalón en el sistema y a partir de ahí, se puede sacar datos de la gráfica como se muestra en la Figura 42 y aplicar las tablas que se muestran en la Figura 43.

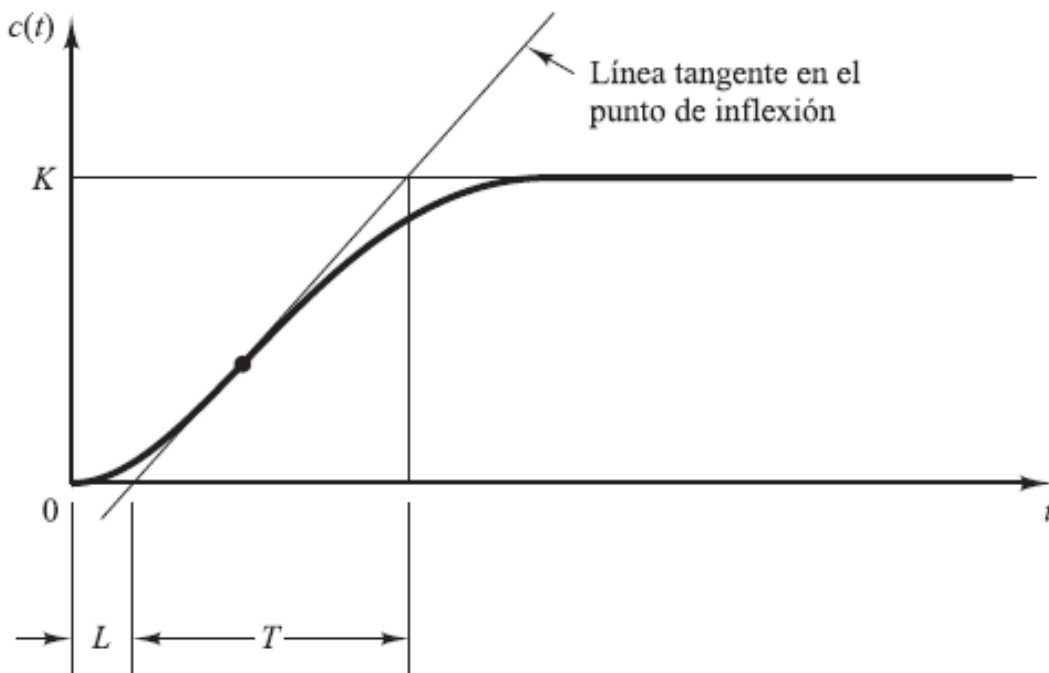


Figura 42 Gráfica de respuesta de un sistema ante un escalón [24]

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Figura 43 Tabla de cálculo de PID del 1º método de Ziegler-Nichols [24]

2º Método Mediante las oscilaciones:

En este método se lleva los valores de $T_i = \infty$ y $T_d = 0$, produciendo que el sistema se vuelva inestable y dejando una respuesta en oscilaciones como se muestra en la Figura 44 y al medir datos en esta grafica como el periodo entre oscilaciones constantes P_{cr} , pudiendo así usar la segunda tabla de Ziegler-Nichols, Figura 45, para calcular el PID del sistema [24].

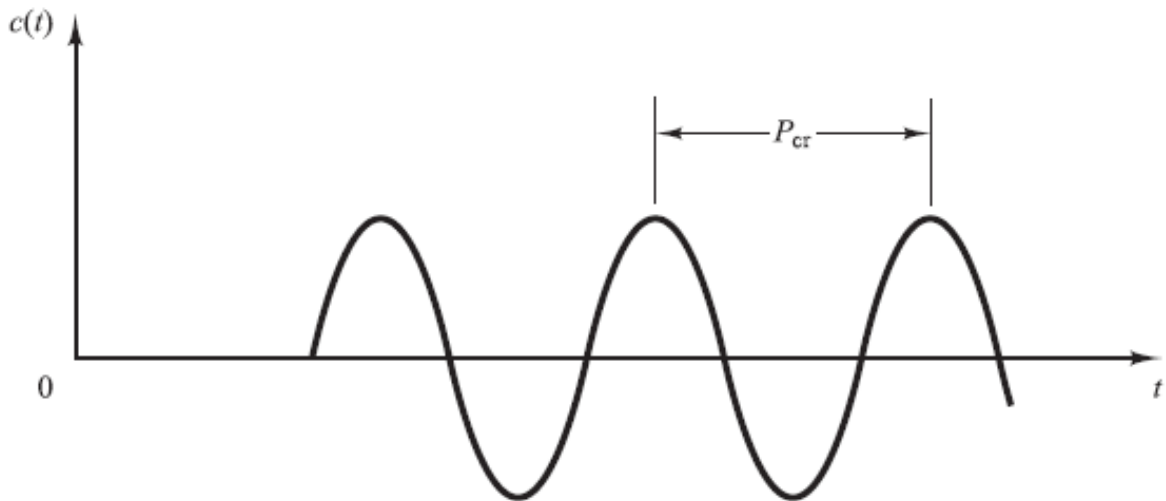


Figura 44 Grafica de un sistema que se ha forzado a oscilar [24]

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Figura 45 Tablas del 2º método de Ziegler-Nichols [24]

3.4.3 Sucesos en la regulación de un sistema

Los distintos parámetros del PID modifican las señal de respuesta de distintas maneras. Hay una serie de eventos que se pueden producir en las señales de respuesta al intentar alcanzar el valor deseado:

- **Sobreoscilacion:** Se produce cuando la señal tarda en estabilizarse alrededor de un valor concreto oscilando más allá de un $\pm 5\%$ porejemplo del valor a alcanzar. Esto puede suponer un problema en sistemas donde la sobreoscilación puede tener consecuencias perjudiciales, como golpes o incluso desestabilizar el sistema.
- **Sobreamortiguacion:** Al contrario que la sobre oscilación, supone una respuesta muy lenta en el tiempo para alcanzar el valor deseado en un sistema de control. Por un lado puede ser factibles para evitar posibles sobreoscilaciones ante algún tipo de perturbación, pero es muy ineficiente.
- **Respuesta critica:** Supone una respuesta para la señal de control perfecta, sin sobreoscilaciones y que es alcanzada en un tiempo razonable

Una respuesta de lazo abierto como se muestra en la Figura 46, puede no resultar en una respuesta precisa y rápida en el tiempo, por ello es necesario la inclusión de valores de PID para mejorarla.

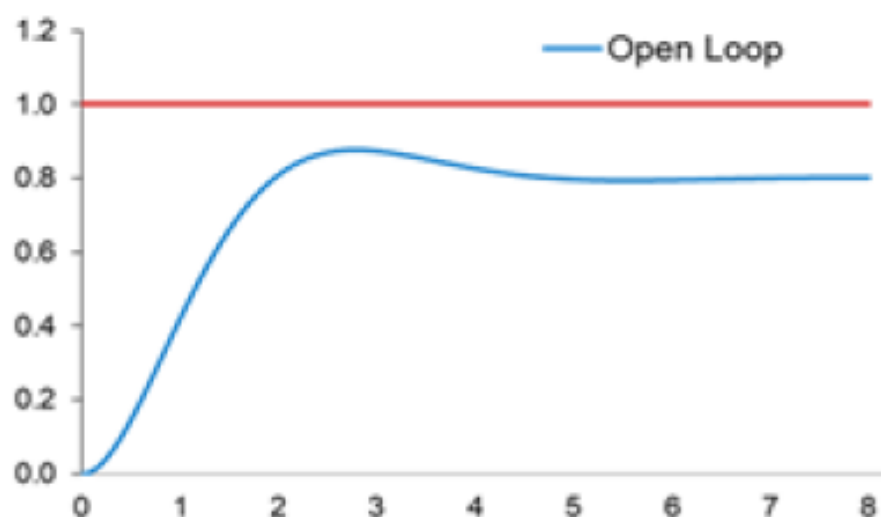


Figura 46 Sistema de ejemplo lazo abierto ante una señal escalón de valor 1 [24]

Por ejemplo un sistema de control solo con proporcional P, su incremento puede disminuir el error y acelerar la respuesta del sistema para alcanzar el valor deseado, pero de superar cierto valor, este empieza a provocar más error y añade cierta sobre oscilación, como se muestra en el ejemplo de la Figura 47 de un sistema de control solo con proporcional.

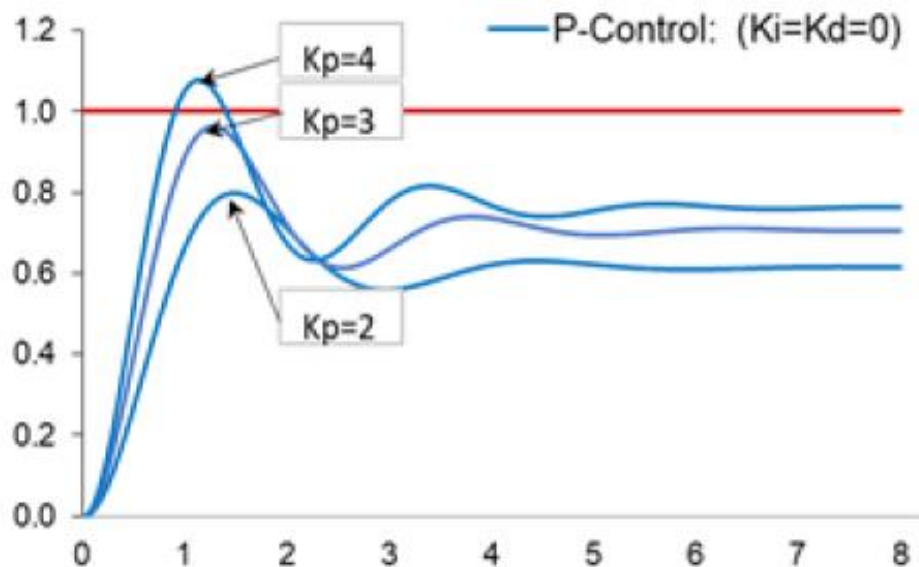


Figura 47 Sistema de ejemplo de control con solo Proporcional [24]

Para mejorar la precisión del sistema para alcanzar el valor objetivo ante la respuesta de un escalón 1, se le añade la Integral, la cual reduce el error alrededor del cual se estabiliza la señal a cambio de un menor tiempo de respuesta, como se puede ver en la Figura 48 de un sistema de control PI, así el error disminuye, pero la señal tarda más en estabilizarse alrededor del valor final (dentro de un error aceptable), pese a aumentar la velocidad de respuesta.

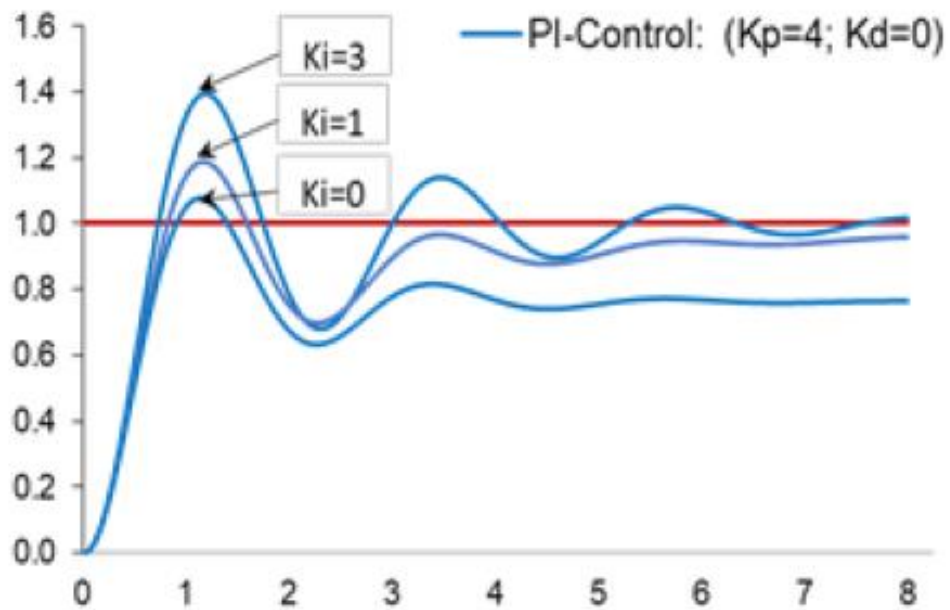


Figura 48 Sistema de ejemplo de control con Proporcional e Integral [24]

Por último para mejorar los tiempos de respuesta y estabilización de la señal, se añade al sistema el derivativo, como se muestra en la Figura 49 al añadir un derivativo y tener un sistema PID permite conseguir respuesta más eficientes y eficaces, ya que evita sobre oscilaciones (peligrosas en algunas aplicaciones) aunque en exceso puede provocar respuestas sobre amortiguadas.

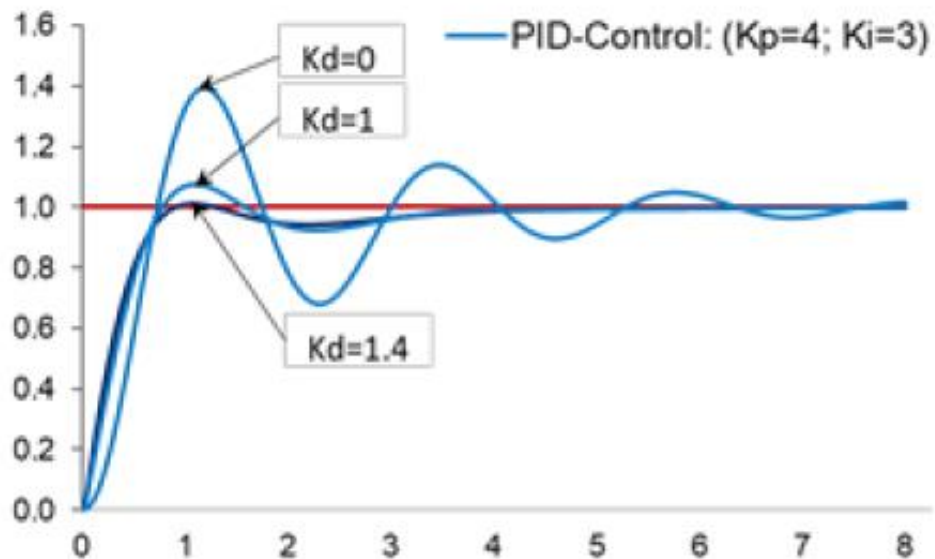


Figura 49 Sistema de ejemplo de control con PID para una respuesta crítica [24]

Resumiendo las propiedades del PID

Acción	Proporcional	Integral	Derivativo
Velocidad	Aumenta	Disminuye	Similar
Sobre nivel	Aumenta	Aumenta	Disminuye
Error Estático	Disminuye	Disminuye	Similar

Tabla 1 Comparación resumida de los efectos de los distintos elementos de un PID

Hay otros factores que afectan a un sistema de control a parte de los parámetros de PID. Algunos de ellos son:

- Resolución: hay un tamaño mínimo viable de la respuesta en una señal de control y este tamaño mínimo perceptible influye en como una respuesta puede ser similar a una curva o, de tener una resolución baja, puede suponer en una señal de tipo escalonada con un error estático fijo
- Histéresis: El alcanzar un valor en un sistema de control estático o dinámico, pueden producirse oscilaciones muy cerca del valor final debido a un intento de corregir hacia el valor final. Esto se debe a que en un intento de corregir un error estático del valor de la señal, se sobre corrija hacia el otro extremo de forma constante y haciendo que el sistema este constantemente "corrigiendo".
- Windup o saturación: En un sistema regulador con una respuesta lenta, la parte integral de un PID continúa integrando el erro haciendo que este crezca de forma descontrolada provocando una salida muy grande para el sistema. Por esto puede ser necesario la inclusión de sistemas anti-windup mediante una integración condicional para no incrementar el error o una realimentación lineal anti-windup para evitar que el error acumulado se des controle.

3.5 Motores eléctricos

Un motor eléctrico es un aparato que permite transformar la energía eléctrica en trabajo para realizar un movimiento por lo general de tipo circular, aunque es posible diseñarse para movimientos lineales o transformar dicho movimiento circular en uno de tipo lineal.

Hay una variedad de tipos de motores eléctricos según su tipo de construcción y la forma en la que usan la electricidad para desplazarse. A continuación se explicarán por encima algunos de ellos.

3.5.1 Motores de corriente alterna (C.A. o AC)

Son todos los motores que aprovechan las frecuencias de un sistema de corriente alterna para mover y controlar un motor eléctrico.

Por lo general son motores eficientes, que requieren de poco mantenimiento (pocos o ningún componente que sufra un gran desgaste como podrían ser las escobillas de un motor de continua) y por ello se les atribuye un largo ciclo de vida.

Estos motores tienden a requerir un variador de frecuencia o inversor para suministrar energía al motor y controlar su movimiento, esto les permite funcionar muy bien para aplicaciones de velocidad constante o que tengan una curva de par exigente.

El control del motor es algo más complejo y suelen ocupar más tamaño, al necesitar de un sistema de variador de frecuencia para controlar el motor.

Tipos:

- Síncronos
- Asíncronos

3.5.2 Motores de Corriente Continua (C.C. o DC)

Son motores más sencillos y económicos que ofrecen un gran control de la velocidad y del par del motor incluso a bajas velocidades.

Constructivamente son sencillos, pero dependiendo de su estructura y funcionamiento pueden requerir de un mantenimiento debido al desgastes de algunos de sus componentes.

Son fáciles de controlar, muchas veces se puede obtener un control relativamente bueno sin la necesidad de drivers o controladores de velocidad (Electronic Speed Controller)

Tipos

- Con escobillas
- Sin escobillas (Brushless)

3.5.3 Motores característicos

3.5.3.1 Motores Stepper

Son un tipo de motores de corriente continua sin escobilla, que tiene las secciones interiores de su estator formado por bobinas de electroimanes que se polarizan para realizar el movimiento de su rotor interior de imanes permanentes.

Son motores que tienen una gran precisión, al permitir que se realicen fracciones de una revolución con cada cambio de polaridad o incluso mantener una posición contra un par alto al mantener la polaridad de sus polos durante un periodo de tiempo.

Por otro lado son considerados motores poco eficientes, ya que cada cambio de polaridad se produce con un alto consumo independientemente del par que se requiera en ese momento y a altas velocidades a veces pueden entrar en resonancia, produciendo errores de movimiento y posición.

3.5.4 Servomotores

Se le suele llamar así a la combinación de un motor eléctrico (generalmente de continua) con algún sistema de transmisión de potencia y sensores de posicionamiento.

Por su combinación son una de las mejores opciones para el control de posición de un sistema de control automatizado, ya que los sistemas más simplificados ni siquiera requieren de una unidad de control especializada para la conmutación del motor, y con una simple orden de posición la poca electrónica que hay en el interior ya se encarga de realizar el desplazamiento.

Los hay de una variedad de tipos dependiendo de si son:

- De giro continuo / Angulo limitado de movimiento
- Sensores de posicionamiento analógicos/ digitales
- De desplazamientos circular / lineal

3.5.5 Frenos y frenada regenerativa

La mayoría de los motores eléctricos al mantenerse alimentados pueden ejercer un mínimo de resistencia la movimiento sin estar necesariamente en movimiento. Esto se debe a la cualidad de muchos de estos motores de funcionar como generadores de electricidad en una necesidad.

En algunas ocasiones esta resistencia es necesaria de reforzar mediante frenos convencionales de fricción, lo cuales permiten a los motores sufrir menos desgaste al no tener que oponerse constantemente a las fuerzas externas, reduciendo así sustancialmente el consumo de energía.

En otras ocasiones se puede aprovechar esta situación y recuperar energía al realizar movimientos en oposición al motor sin alimentar este y volcar esta energía en una fuente de alimentación donde se almacena para su posterior uso.

Estos sistemas no son ideales, debidos a las pérdidas que se producen sobre todo en forma de calor, pero permite alargar las horas operativas de los sistemas que usan estos motores.

3.6 Fuentes de alimentación

3.6.1.1 Introducción

Las baterías son dispositivos que almacenan y liberan energía eléctrica mediante una reacción química. Se componen de varias piezas clave, como los electrodos, el electrolito y un separador que se posiciona entre ellos [25].

- **Electrodos:** Las baterías tienen dos electrodos, el cátodo y el ánodo. El cátodo es el electrodo donde se producen las reacciones de reducción durante la descarga (cuando la batería está en uso), mientras que el ánodo es donde tienen lugar las reacciones de oxidación. Estas reacciones implican la transferencia de electrones entre los dos electrodos.
- **Electrolito:** El electrolito es una sustancia que permite el flujo de iones entre los electrodos. Suele ser un líquido o gel que contiene iones que facilitan las reacciones químicas. El electrolito desempeña un papel crucial en el rendimiento general de la batería y determina factores como el voltaje y la densidad de potencia de la batería.
- **Separador:** El separador es una barrera física que se coloca entre el cátodo y el ánodo para evitar que entren en contacto directo. Permite el movimiento de iones pero bloquea el paso de electrones, asegurando que la corriente eléctrica fluya a través del circuito externo en lugar de cortocircuitar internamente la batería.

3.6.1.2 Tipos de baterías

Algunos ejemplos de los tipos de baterías más usadas son [25]:

- **Baterías alcalinas:** Las baterías alcalinas son un tipo popular de pilas desechables. Utilizan un cátodo de dióxido de manganeso y un ánodo de zinc, con un electrolito alcalino (el más comúnmente usado es el hidróxido de potasio). Las pilas alcalinas se utilizan habitualmente en dispositivos domésticos como mandos a distancia y aparatos electrónicos portátiles.

- **Baterías de iones de litio:** Las baterías de iones de litio son baterías recargables conocidas por su alta densidad energética. Utilizan compuestos de litio en el cátodo y dependiendo de la composición de este compuesto (normalmente óxido de litio y cobalto, fosfato de litio y hierro u óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto) surgen distintas variedades de batería de Litio (LiC, FP, NCM, etc). Además usan carbono o grafito en el ánodo. El electrolito es una sal de litio disuelta en un disolvente orgánico que suele encontrarse en un estado líquido, aunque una de las principales áreas de desarrollo es la implementación de un electrolito sólido más estable y resistente a factores externos como impactos, temperatura, llamas, etc. Las baterías de iones de litio se utilizan ampliamente en electrónica de consumo portátil, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de todo tipo.
- **Baterías de plomo-ácido:** Las baterías de plomo-ácido se utilizan habitualmente en aplicaciones de automoción, como fuentes de energía de reserva o en otros sistemas similares de aplicación industriales que requieren movilidad. Están formadas por dióxido de plomo como cátodo, plomo como ánodo y ácido sulfúrico como electrolito. Las baterías de plomo-ácido son relativamente baratas y tienen una buena relación peso-potencia, pero su densidad energética es menor que la de otros tipos.
- **Baterías de níquel-hidruro metálico (NiMH):** Las pilas de NiMH son otro tipo de pilas recargables. Utilizan un cátodo de hidróxido de níquel, un ánodo de aleación que absorbe hidrógeno y un electrolito de hidróxido de potasio. Las pilas de NiMH tienen una mayor densidad energética que las de plomo-ácido y se utilizaban habitualmente en aparatos electrónicos portátiles y vehículos híbridos antes de que se introdujeran las baterías de NiMH.

El número de elementos de una batería afecta a su tensión. Cada célula contribuye con un voltaje determinado, y el voltaje total de la pila es la suma de los voltajes de las células individuales. Por ejemplo, una pila alcalina AA típica tiene 1,5 voltios, mientras que una pila de iones de litio utilizada en portátiles y smartphones suele tener 3,7 voltios. Si se conectan varias pilas en serie, se puede aumentar el voltaje total de la batería [26].

De la misma manera las células individuales de una batería vienen determinada por su manera de fabricación y montaje, por ejemplo hay sistemas de pack en bolsa o de cilindro.

También dependiendo de su composición hay limitaciones a la profundidad de la descarga de las baterías, el número de ciclos que duraran y la degradación de dichas baterías.

3.6.1.3 El tipo de carga

El tipo de carga (es decir, si la batería se está cargando o descargando) afecta a la dirección de las reacciones químicas dentro de la batería. Durante la carga, una fuente de energía externa aplica una tensión más alta a la batería, haciendo que las reacciones se produzcan en sentido inverso. Esto permite a la pila almacenar energía. Durante la descarga, la energía almacenada se libera en forma de corriente eléctrica cuando se conecta un dispositivo a la batería.

La tasa de carga o “C” de una batería determina el ratio de carga/descarga que admite una batería, esto es de gran utilidad a la hora de determinar cuántos vatios podemos extraer para utilizar en un dispositivo, así como la posibilidad de realizar recargas rápidas de las baterías ,ambas a costa de la vida útil de la batería y de la eficiencia del proceso, ya que se genera bastante calor en el proceso resultante de perdidas en el proceso y afectando a la batería

Aunque rara vez se indica explícitamente, la unidad de la tasa C es h^{-1} , lo que equivale a indicar la capacidad de la batería para almacenar una carga eléctrica en unidades de hora por la corriente en la misma unidad que la corriente de carga o descarga. La tasa C nunca es negativa, por lo que el hecho de que describa un proceso de carga o descarga depende del contexto.

Por ejemplo, una batería de una capacidad de 1000 mAh con una tasa de descarga de 5000 mAh corresponderá a $\frac{1000 \text{ mAh}}{5000 \text{ mAh}} = 5C$ lo que significa que esta batería puede llegar a descargas 5 veces su capacidad en el periodo de tiempo de una hora si fuese necesario. Si la características de la batería fuesen las inversas (capacidad 5000 mAh y descarga de 1000 mAh) entonces se diría que tiene una capacidad de C/5 ya que tardaría 5 horas en descargarse por completo [25], [26].

3.6.1.4 Proceso de carga

Normalmente el proceso de carga viene dado por un sistema de gestión de la batería o BMS por sus siglas en inglés. Este es el encargado de que una batería se encuentra dentro del rango aceptable de voltaje y la corriente que circula hacia la batería durante el proceso de carga, la temperatura es correcta y que no haya un desbalanceado de las células no es.

La recarga de una BMS no es lineal, suele ir guiada por unas curvas de carga dadas por el fabricante que suele incrementar poco a poco hasta alcanzar una potencia de carga máxima, para luego disminuir gradualmente según se empieza a alcanzar el límite de capacidad de la batería.

La carga no es perfecta y es común que el BMS realice otras tareas en paralelo, ya que tiene que tener en cuenta la temperatura y el balance entre las distintas células que conforman la batería, razón por la cual en ocasiones realiza descargas parciales (también es común que se realice este proceso si se va a proceder a almacenar estas baterías, ya que no es bueno que estén a “rebosar” si no van a ser utilizadas durante mucho tiempo)

Capítulo 4 HARDWARE NECESARIO PARA UN PROTOTIPO

4.1 Simulaciones

La parte de simulaciones la llevaremos con una combinación de SolidWorks y Matlab.

En Matlab utilizaremos el módulo de Simscape Multibody por el cual podemos exportar un modelo 3D y realizar una simulación dinámica de cómo se comporta ante ciertas variables como pueden ser Par, velocidad, cambios de posición, etc.

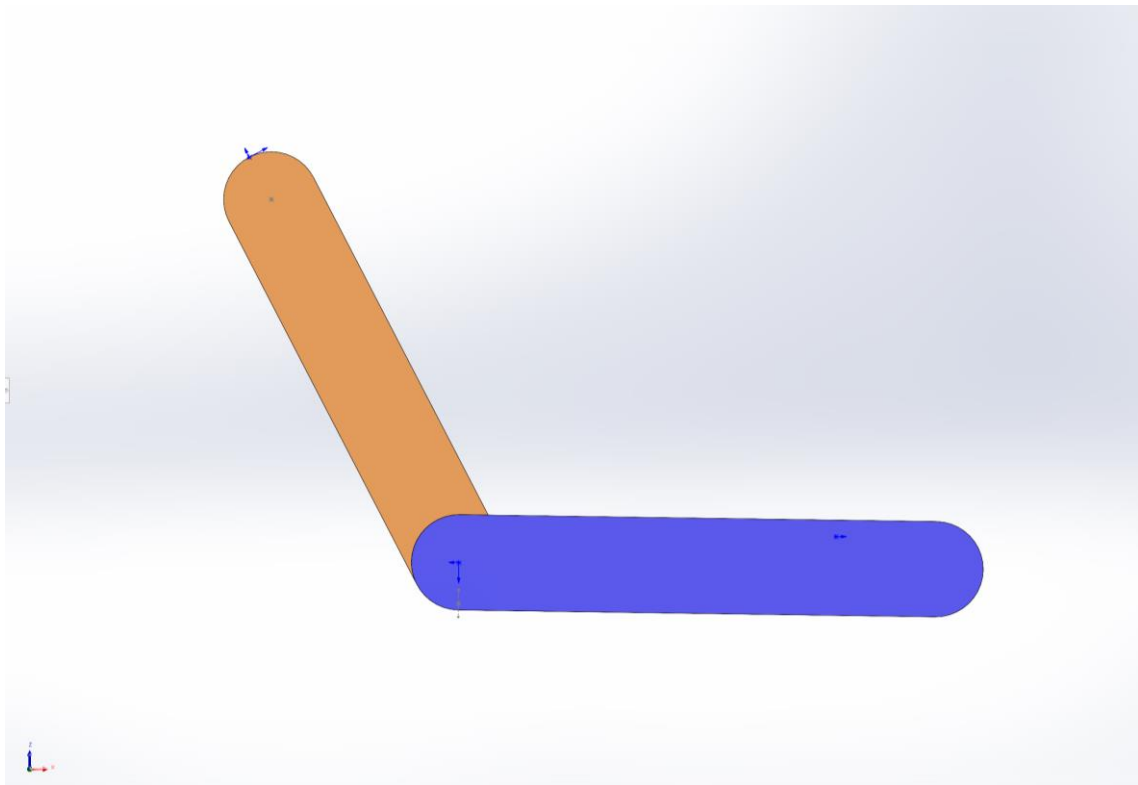


Figura 50 ensamblaje de Codo simple

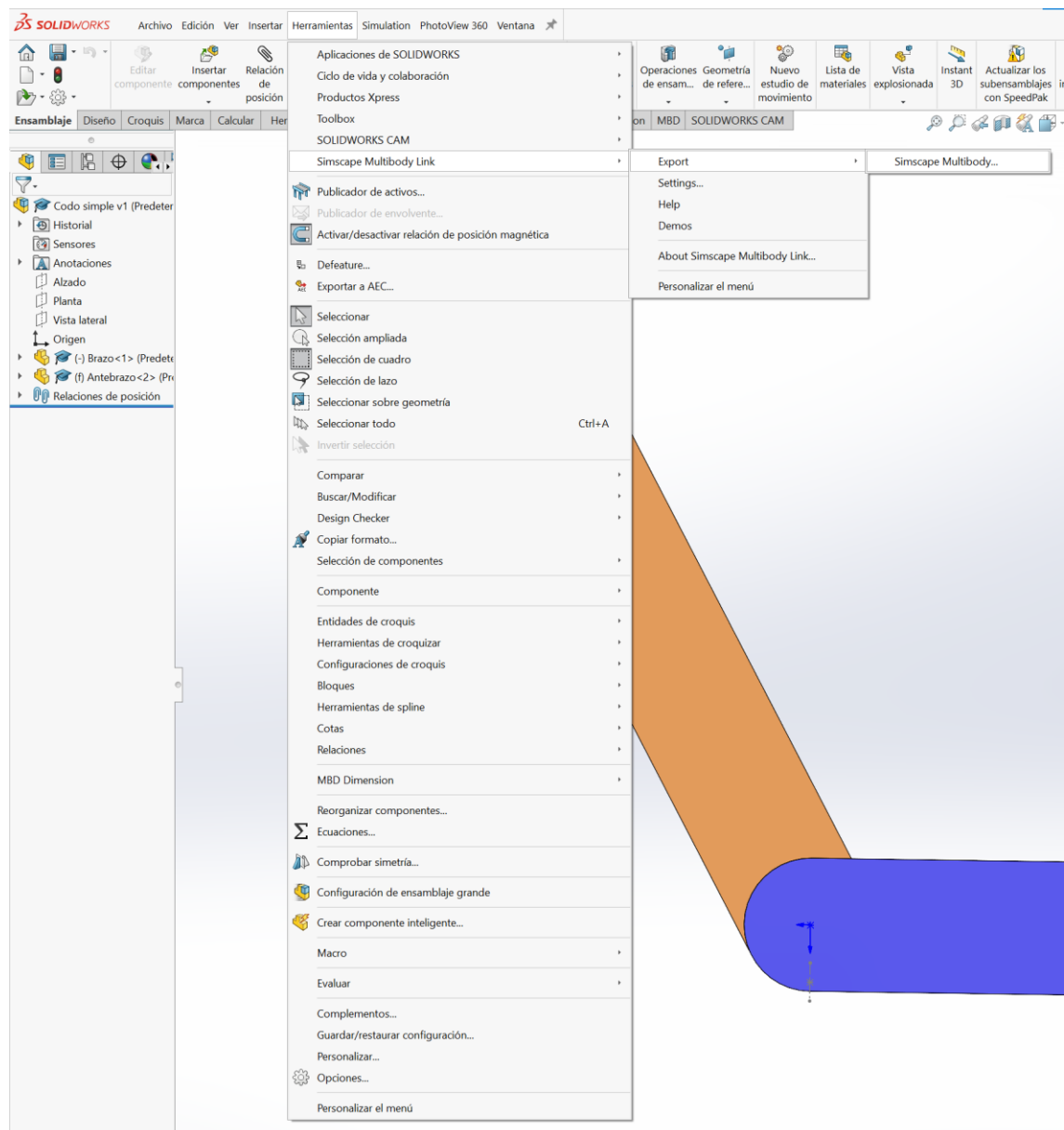
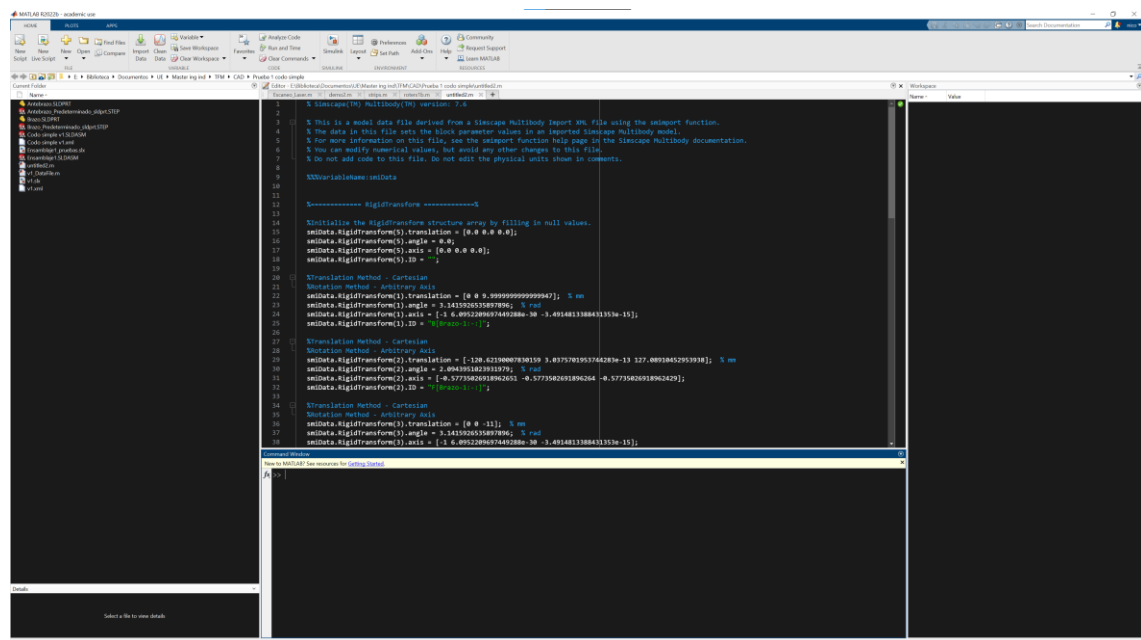


Figura 51 como exportar a Matlab Simscape Multibody el ensamblaje de Codo simple

Una vez que se realiza la exportación, obtendremos un archivo .xml que podemos importar en Matlab para obtener el modelo sobre el que realizaremos las simulaciones.



```
>> smimport('Codo_simple_v1.xml')
```

Figura 52 Como se realiza la importación de los archivos generados en SolidWorks a Matlab

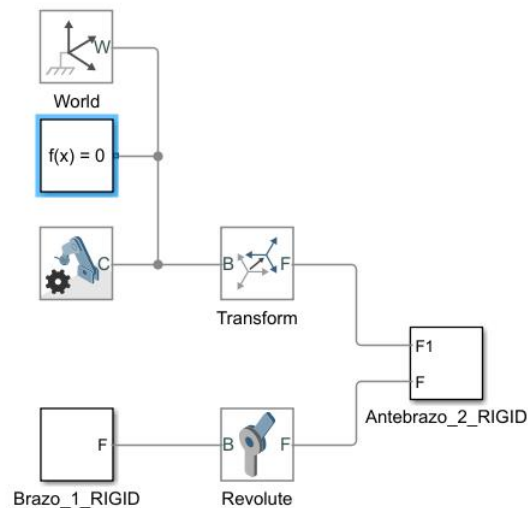


Figura 53 Modelo de simulación resultante de la importación

Tras la importación es recomendable el ordenar los bloques para una mejor lectura y posteriormente modificar parámetros del sistema, como asegurarse que la gravedad actúa en la dirección en la que queremos utilizar el modelo para simular.

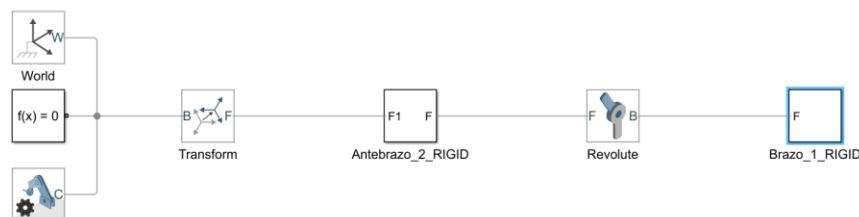


Figura 54 Modelo generado ordenado para mayor claridad

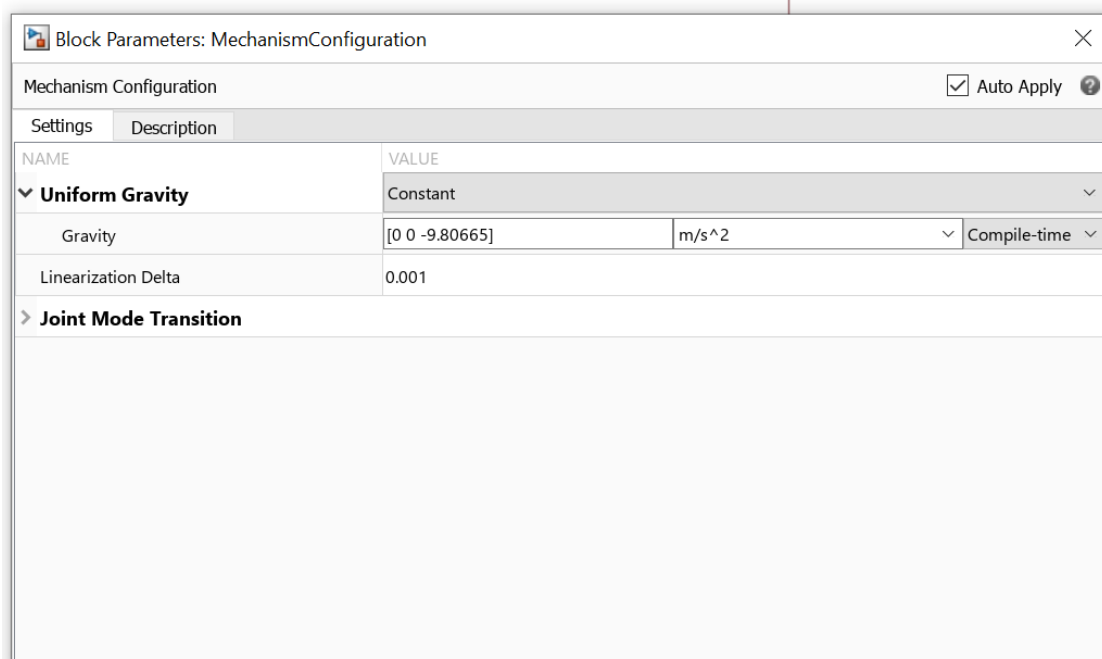


Figura 55 Modificación del parámetro de dirección de la gravedad

Tras modificar este parámetro ya podemos empezar a ver los resultados y comprobar que los movimientos de la articulación son correctos.

Al dar al botón de Start se abrirá una ventana emergente con una simulación para un espacio de tiempo escogido por nosotros.

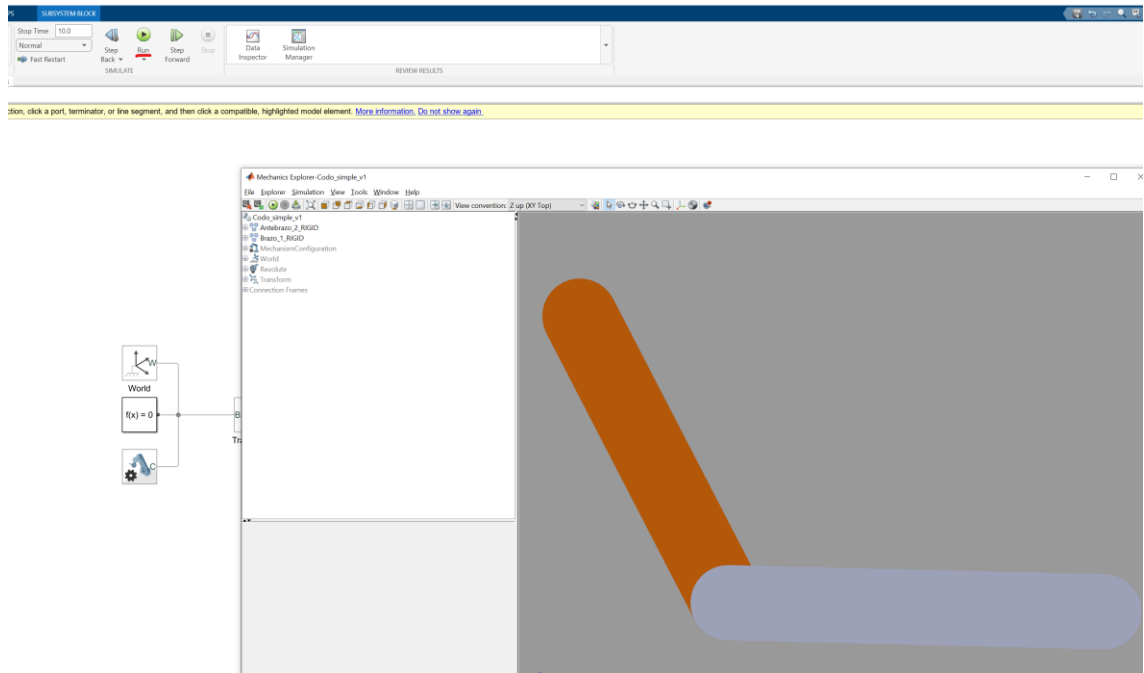


Figura 56 Ventana resultante de iniciar la simulación

Con esto podemos ver si el movimiento se corresponde al de un péndulo, ya que solo tiene la fuerza de la gravedad y en efecto el movimiento resultante es el de un péndulo, aunque uno casi perfecto. Siendo el elemento naranja el que conecta al hombro y por tanto esta hijo

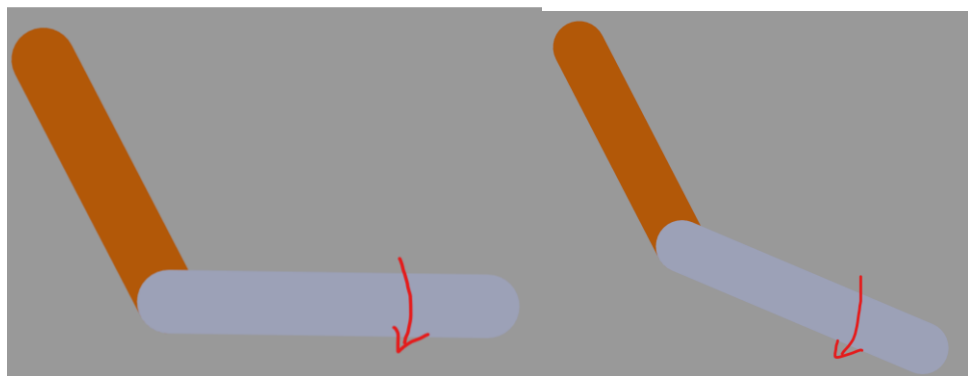


Figura 57 Fuerza gravitatoria que genera un movimiento de péndulo

Sin embargo no vale solo con visualizarlo, es necesario hacer un seguimiento y graficar de varios parámetros.

Para ello modificamos los parámetros de la revolución para añadir variables de seguimientos de velocidad, posición y par.

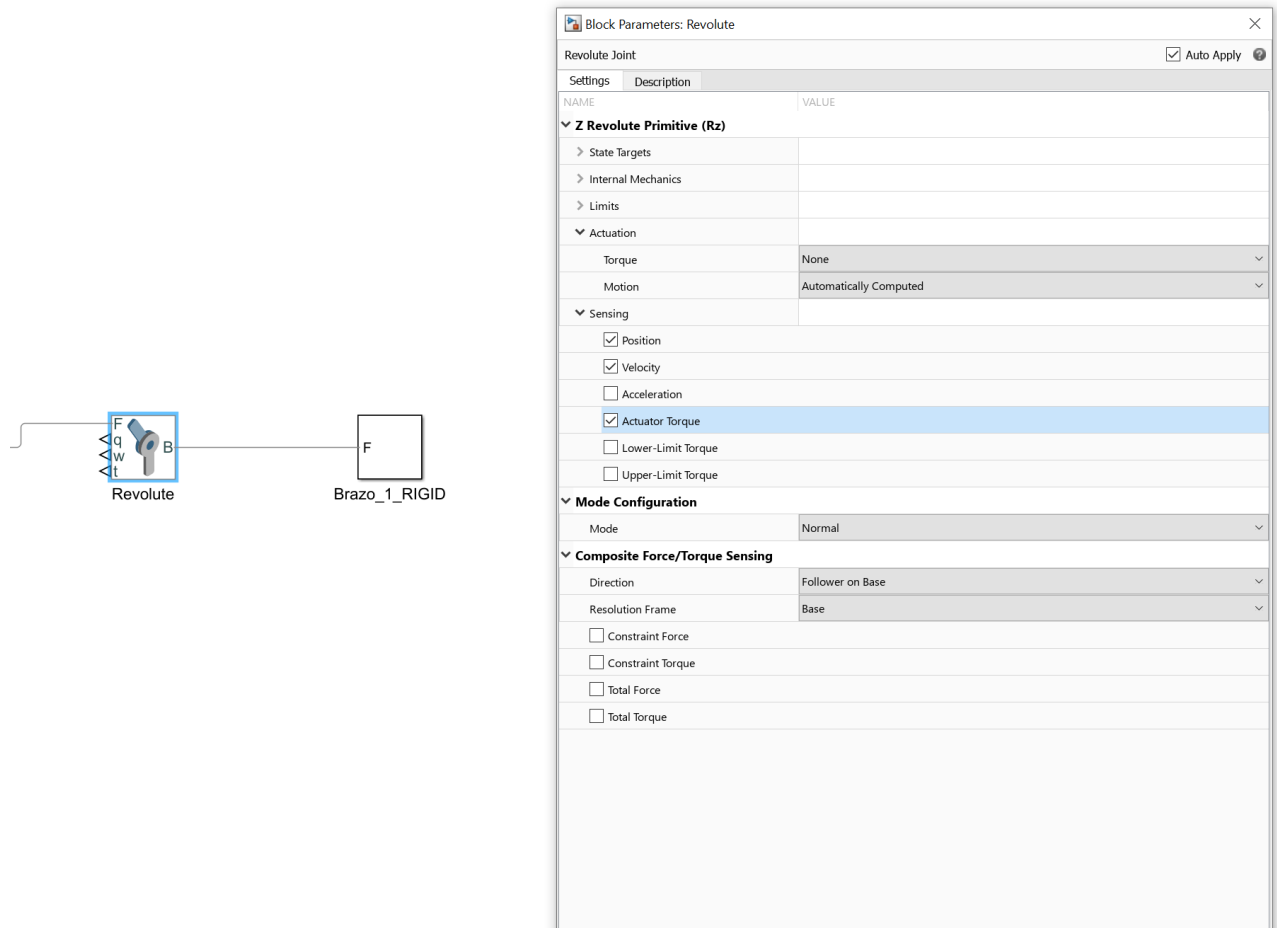


Figura 58 Opciones de entradas y salidas disponibles en el cuadro de revolución

Al añadir estas variables de seguimiento adicionales podemos, después de transformar los datos, a algo que se puede graficar y con lo que realizar una comparación del movimiento del sistema y de la variables.

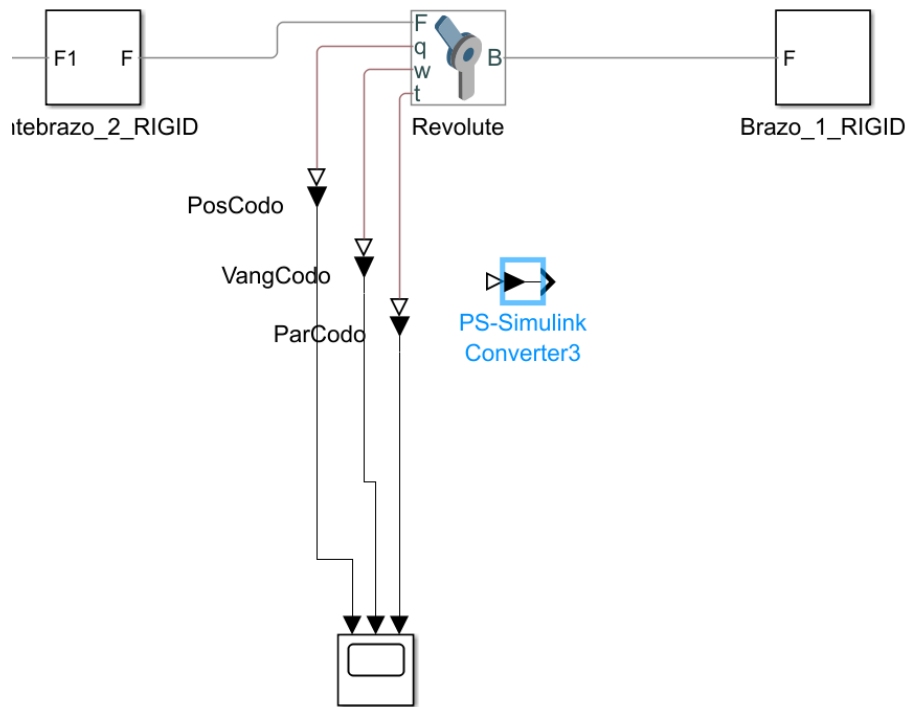


Figura 59 Uso de conversores PS-Simulink para poder graficar los distintos parámetros.

De esta forma al darle a Start podemos obtener la actuación del codo con todos las variables en radianes

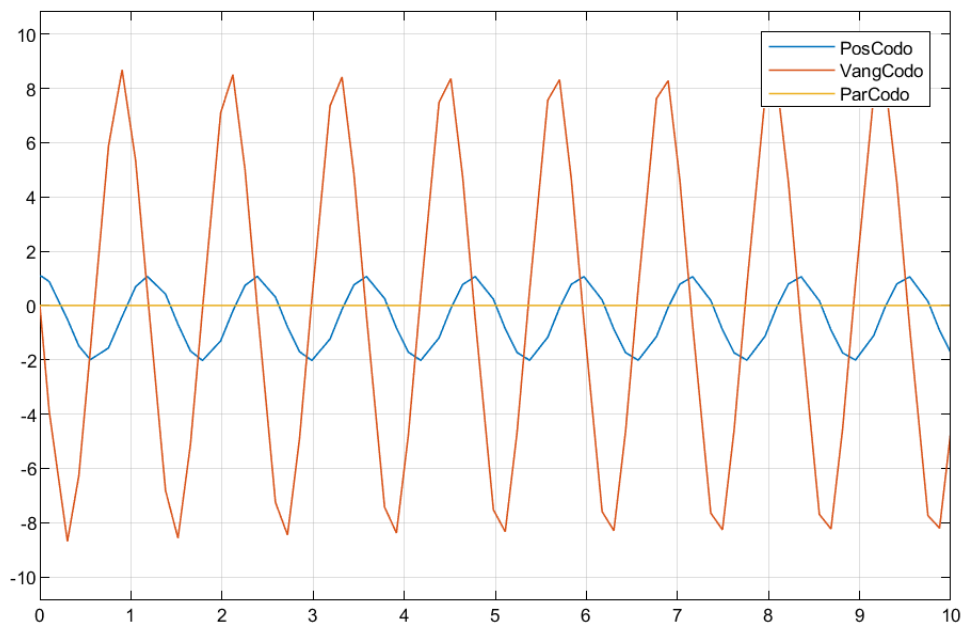


Figura 60 Grafica de movimiento de péndulo del codo sobre valores de posición, velocidad y par

Para mejorar la interpretación de los datos podemos cambiar la representación de la posición de radianes a grados. La velocidad quedara en rad/s ya que tiene valores entre 0-10 rad/s y el par rondara 0-10 N*m.

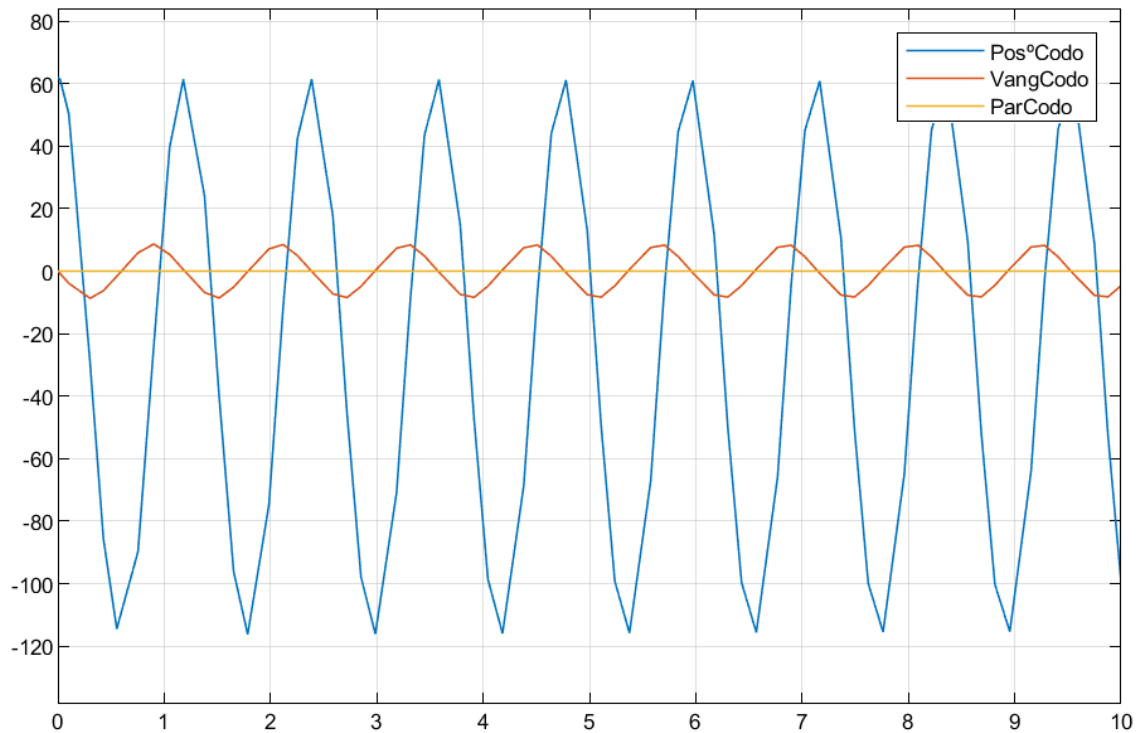


Figura 61 Cambio de unidades de posición a grados para mejor visualización

De estos datos podemos ver que la oscilación tiene una variación de la velocidad y posición del codo, pero que no supone un cambio en el par que tiene que ejercer el codo

A continuación incluiremos parámetros adicionales:

- Inicialización de una posición inicial del ángulo del codo
- Limitación del ángulo máximo de la posición
- Limitación del ángulo mínimo de la posición
- Activación del control por Input del par a ejercer (Torque)
- Implementación de una rampa de respuesta para simular el tiempo de activación del motor hasta otorgar el par suficiente

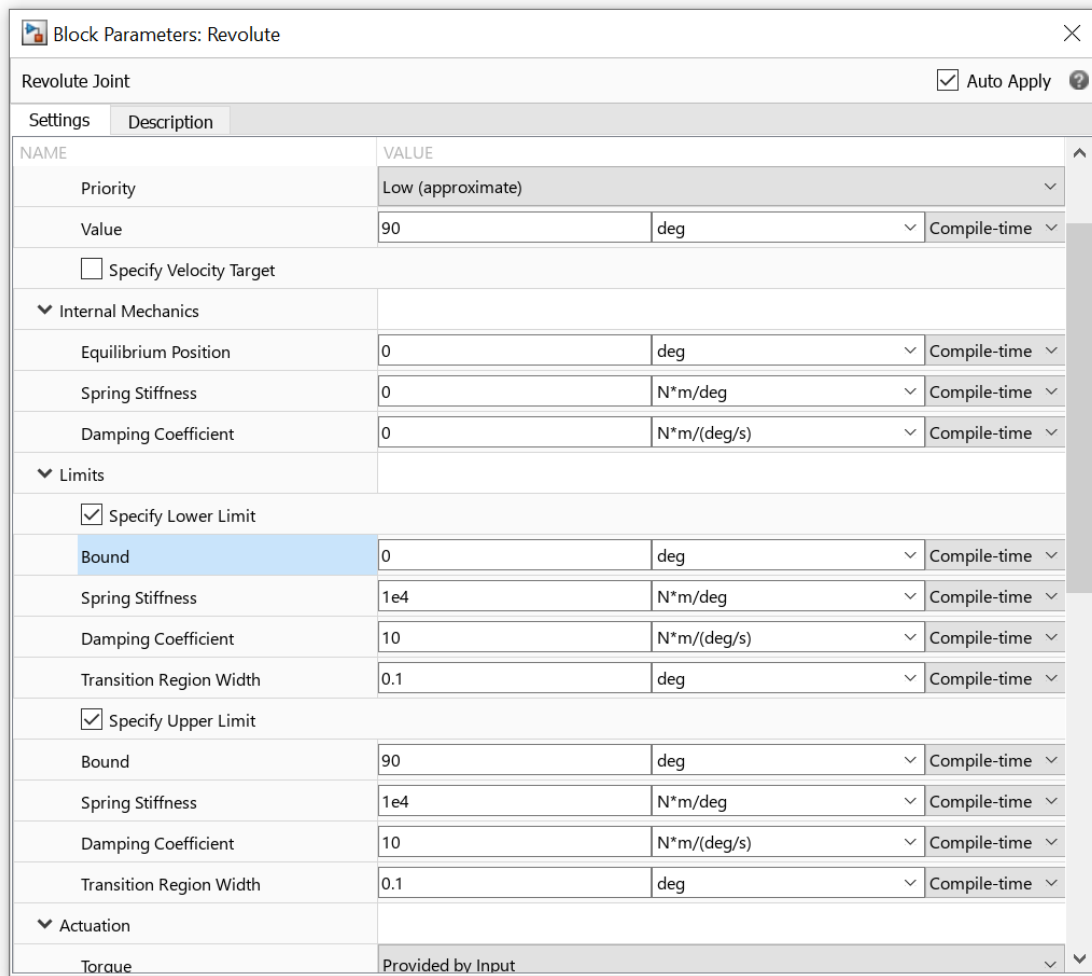


Figura 62 Caracterización de los parámetros iniciales del codo

Para unos parámetros iniciales de 0,5 N*m iniciales y una rampa de 0,5 obtenemos una respuesta un poco lenta, pero nos permite ver la conducta del codo al intentar compensar la propia carga del codo añadiendo par hasta alcanzar compensación y después un movimiento en la dirección deseada.

De forma adicional se puede observar en la gráfica que los parámetros se encuentran en funcionamiento, ya que se impone la posición inicial de 90° así como los límites físicos de 0° límite mínimo y 90° máximo.

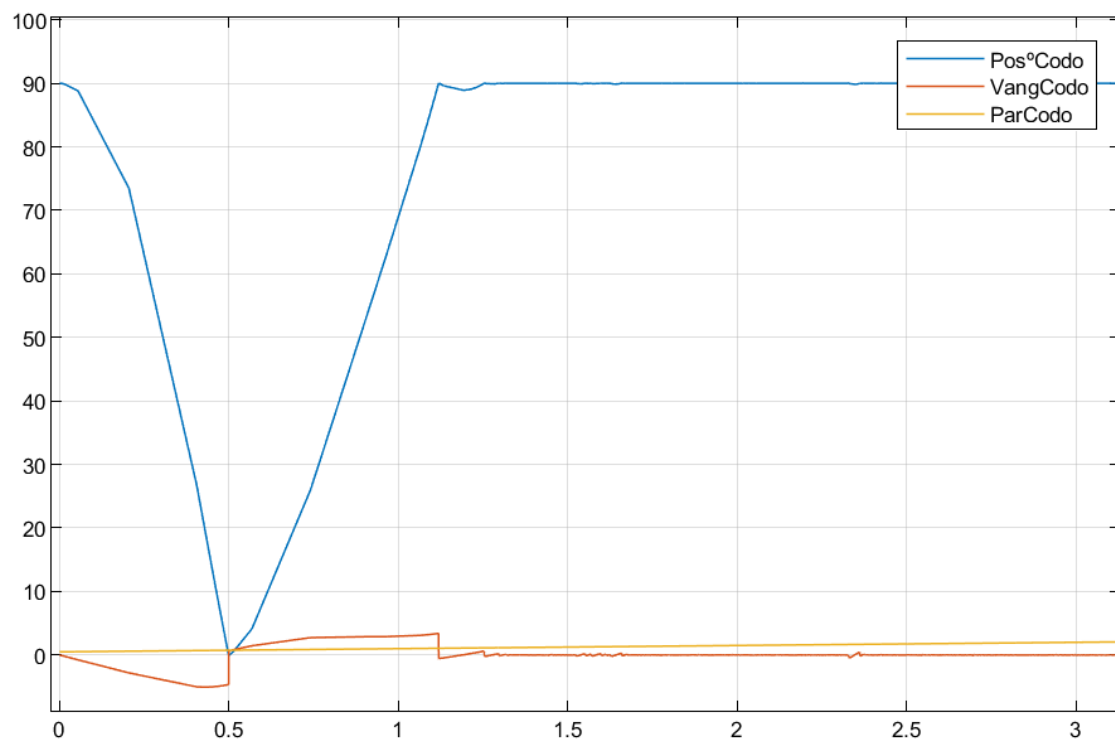


Figura 63 Respuesta de par ante la carga intrínseca de la articulación

A continuación es necesario añadir configuraciones adicionales:

- Saturación de la rampa de par para limitarla a unos $5,5\text{N}\cdot\text{m}$ que correspondería al par producido por un pequeño motor de corriente continua con reductora
- Cambio de la configuración de la barra de brazo para añadir peso adicional simulando una carga depositada en el codo y ver cómo actúa

La primera parte es fácil de aplicar ya que con configurar el bloque de saturación tenemos ya todo configurado.

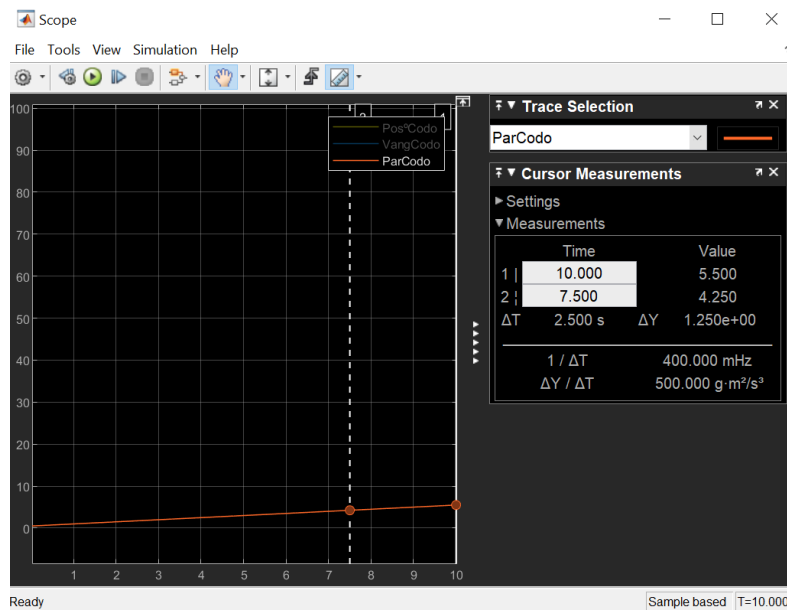
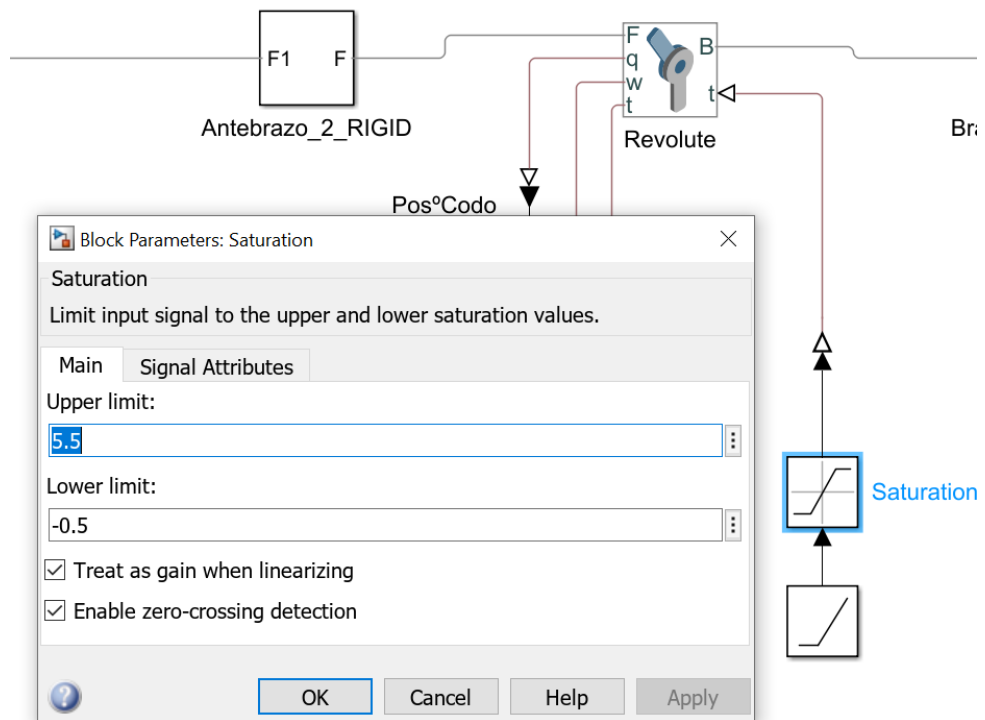


Figura 64 Configuración de la saturación de una rampa y comprobación de la misma

Para la segunda configuración añadimos una masa adicional al brazo rígido con sus mismas características, pero con una unidad de masa que introducimos de manera manual, de esa forma nos será posible simular como afecta al sistema un kilogramo adicional de carga.

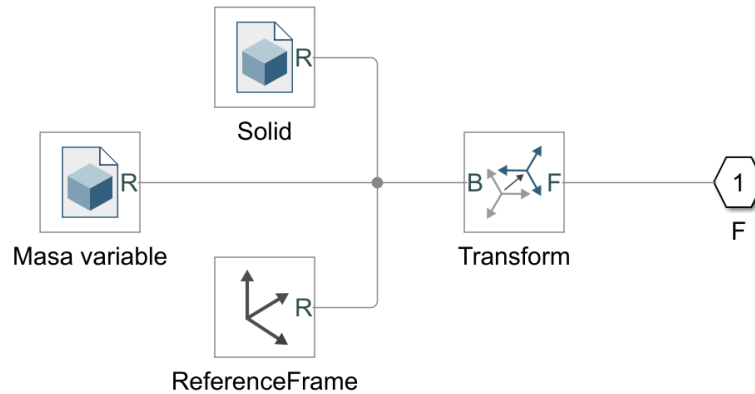


Figura 65 Configuración para añadir una carga adicional configurable al sistema de simulación

Y a la hora de simular la nueva carga

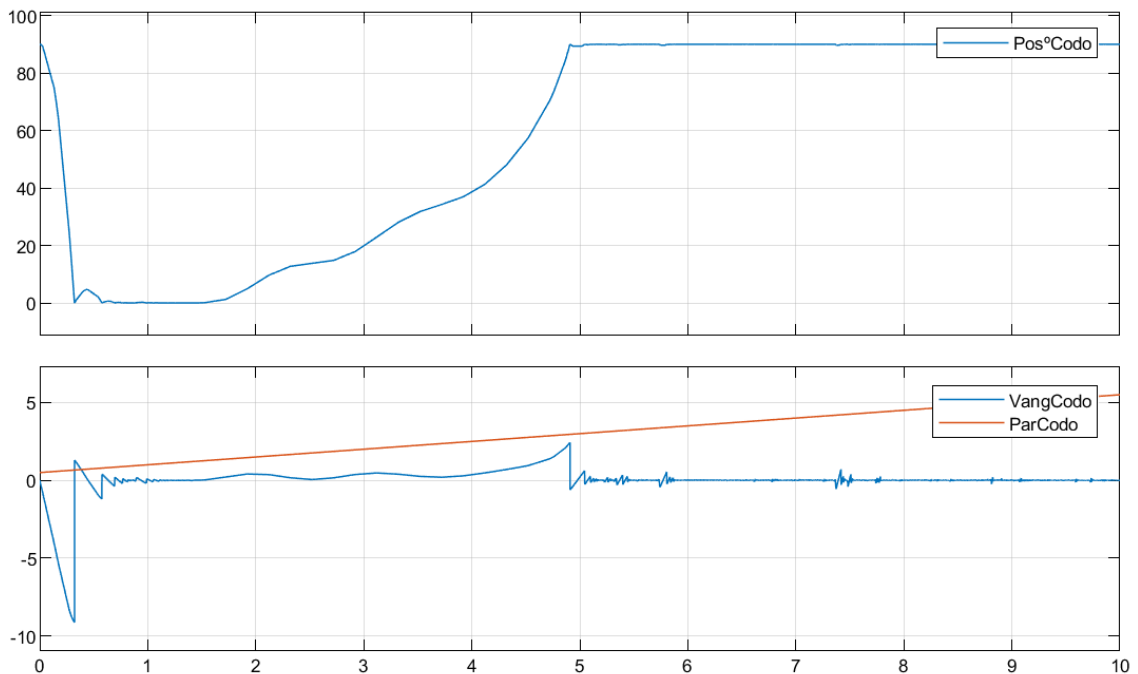


Figura 66 Grafica de parámetros para la compensación de 1Kg adicional para el sistema

Hasta el momento las simulaciones realizadas tenían parámetros pequeños para demostrar los movimientos y fuerzas a los que esta ejecutado el sistema, pero tras añadir una carga algo más realista, es necesario la inclusión de:

- Un par mínimo correspondiente a la resistencia de una reductora con un motor acoplado sin que este último ejerza fuerza
- Inclusión de amortiguadores y rigidez de los materiales
- El aumento de la pendiente de la rampa saturado de respuesta del motor a valores más realistas (par máximos entre 0.5s-0,25s)

Para solamente la mejora se puede apreciar la mejora al mantener la posición entre respuestas de 1 segundo, 0,5 segundos y 0,25 segundos.

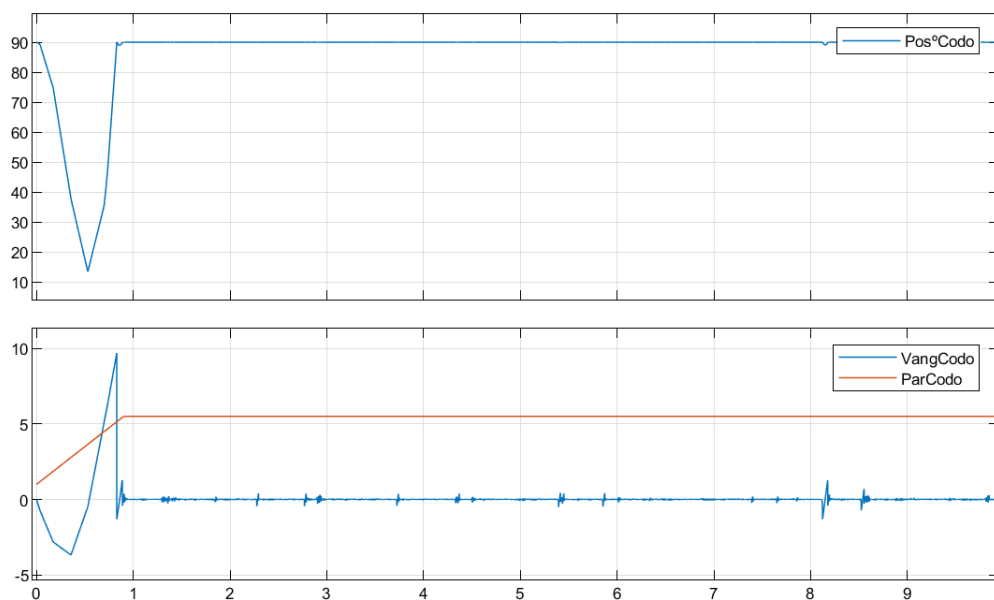


Figura 67 Grafica para mantenimiento de la posición rampa de par hasta el máximo en 1 segundo

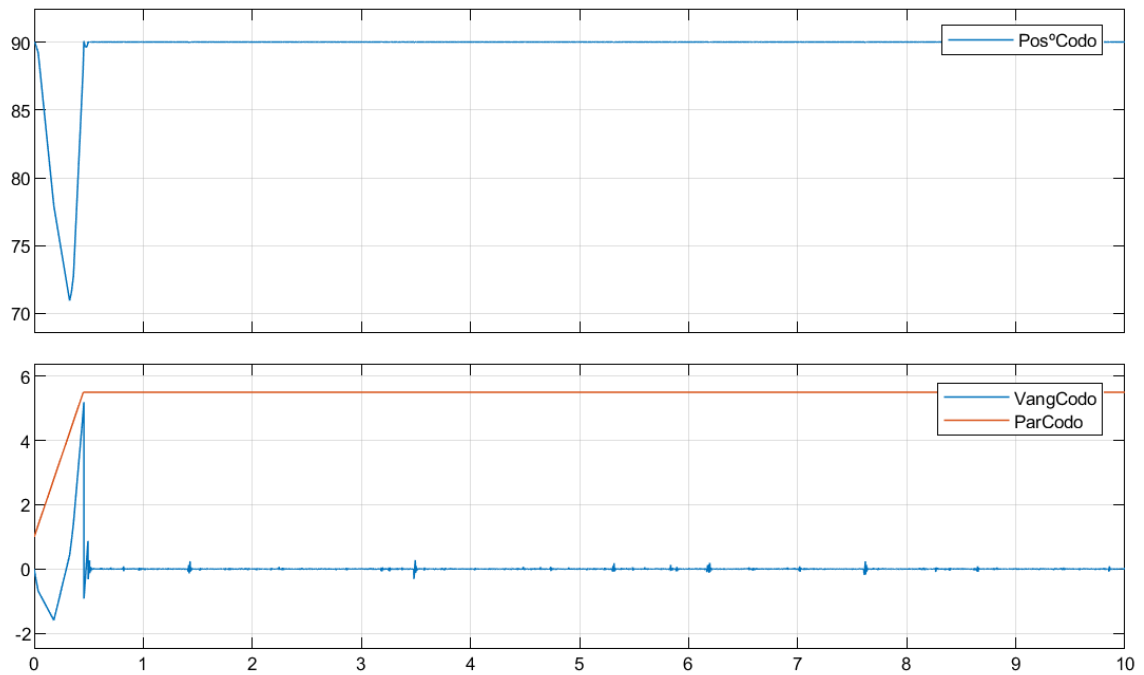


Figura 68 para mantenimiento de la posición rampa de par hasta el máximo en 0.5 segundos

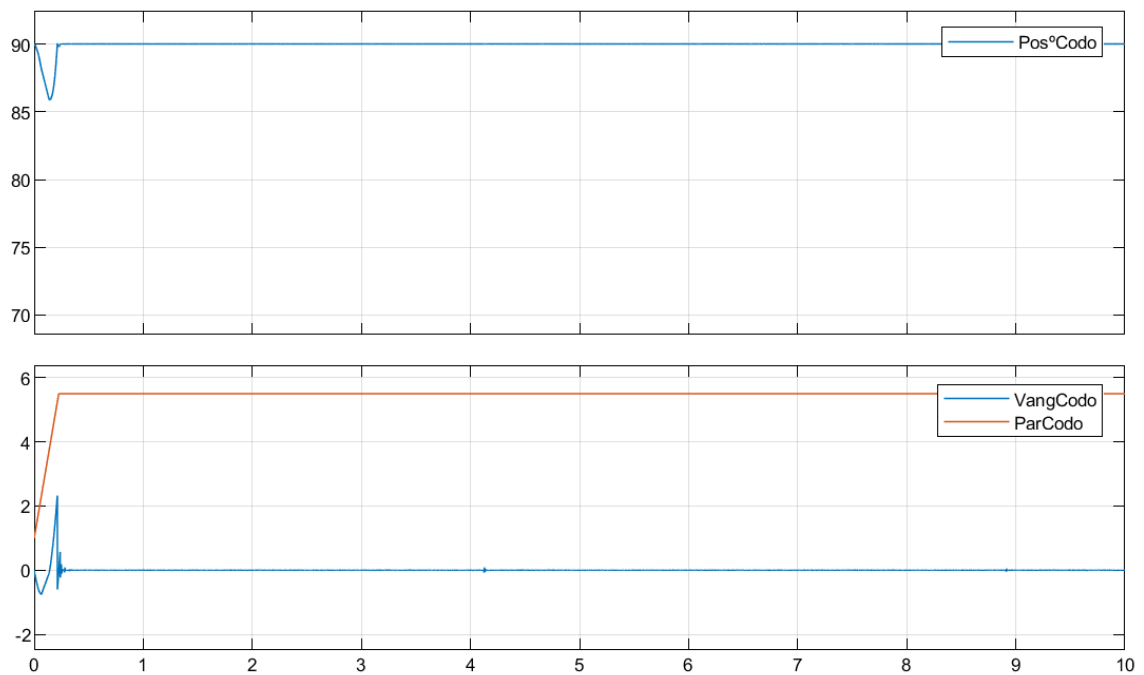


Figura 69 para mantenimiento de la posición rampa de par hasta el máximo en 0.25 segundos

La mejora de la respuesta se nota mucho aunque produce también oscilaciones, por lo que es necesario añadir los parámetros de amortiguación B y de rigidez K.

La adición de un mecanismo de actuador elástico permite (parte de color verde) obtener mejores respuestas del par además de reducir las velocidades para poder realizar movimientos más permisivos correspondientes a la robótica blanda.

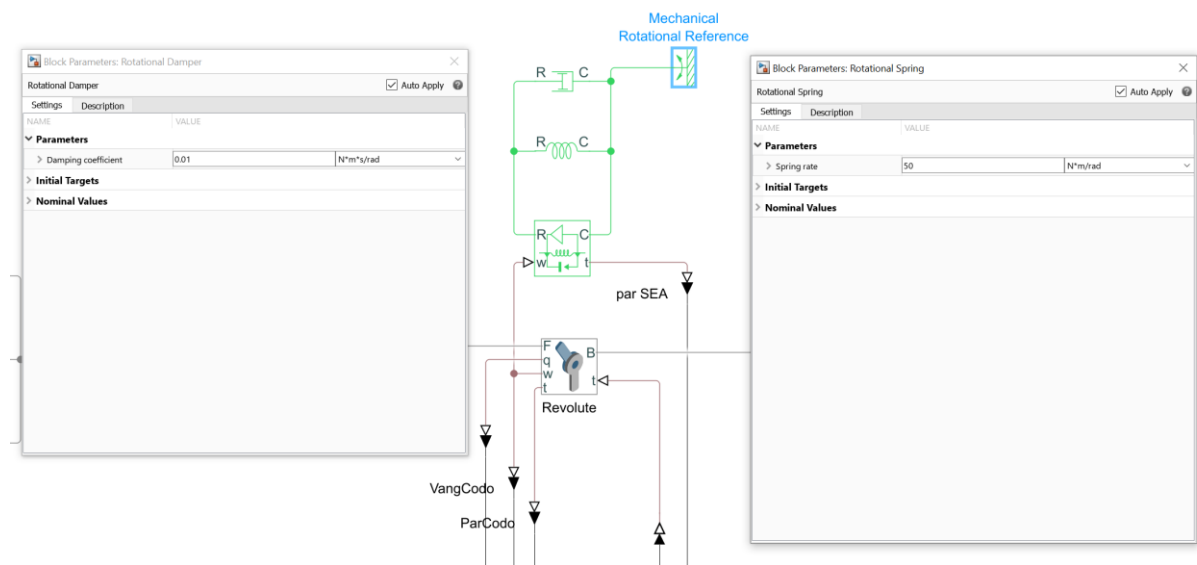


Figura 70 Diagrama de bloques para el sistema de control + SEA

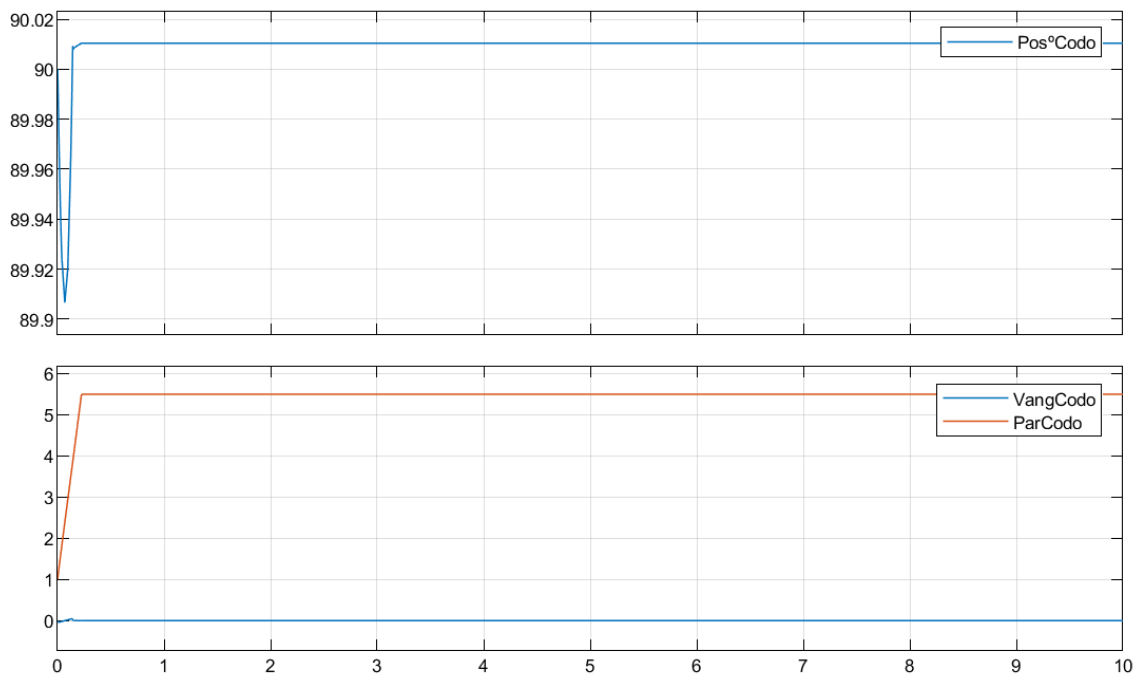


Figura 71 Grafica de parámetros de posición, velocidad y par del sistema + SEA

A continuación vamos a incrementar el peso de la masa variable para poder ver cómo actúa el sistema al ponerse al límite.

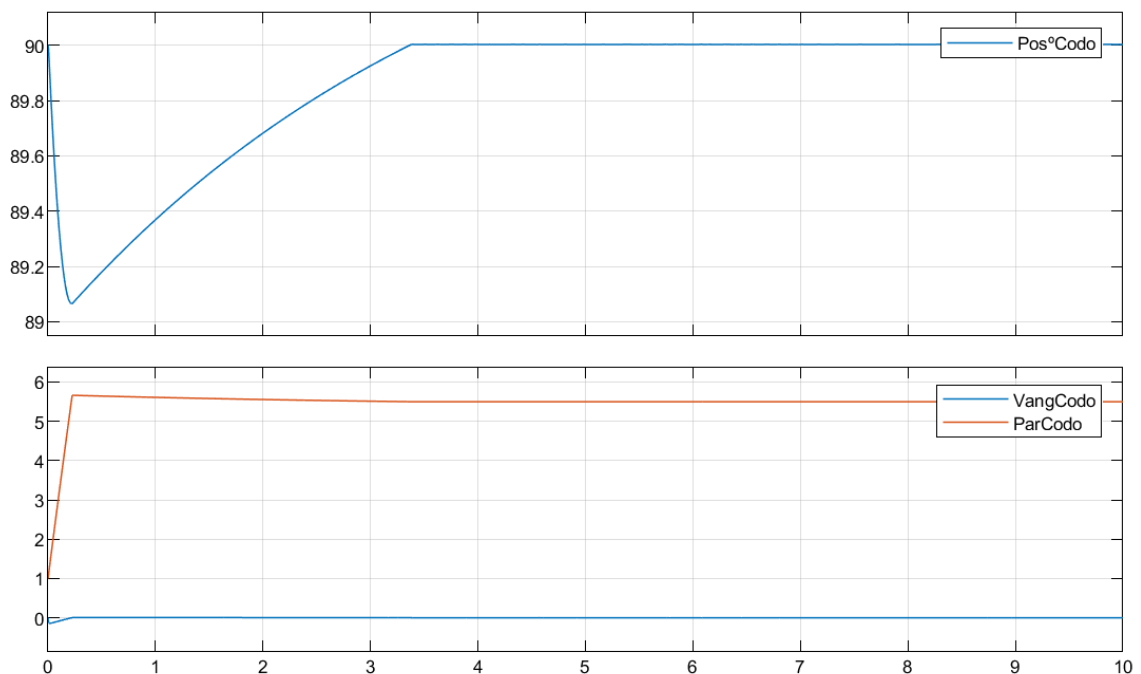


Figura 72 Grafica de reacción de los parámetros de posición, velocidad y par del sistema + SEA para una carga adicional de 3 Kg

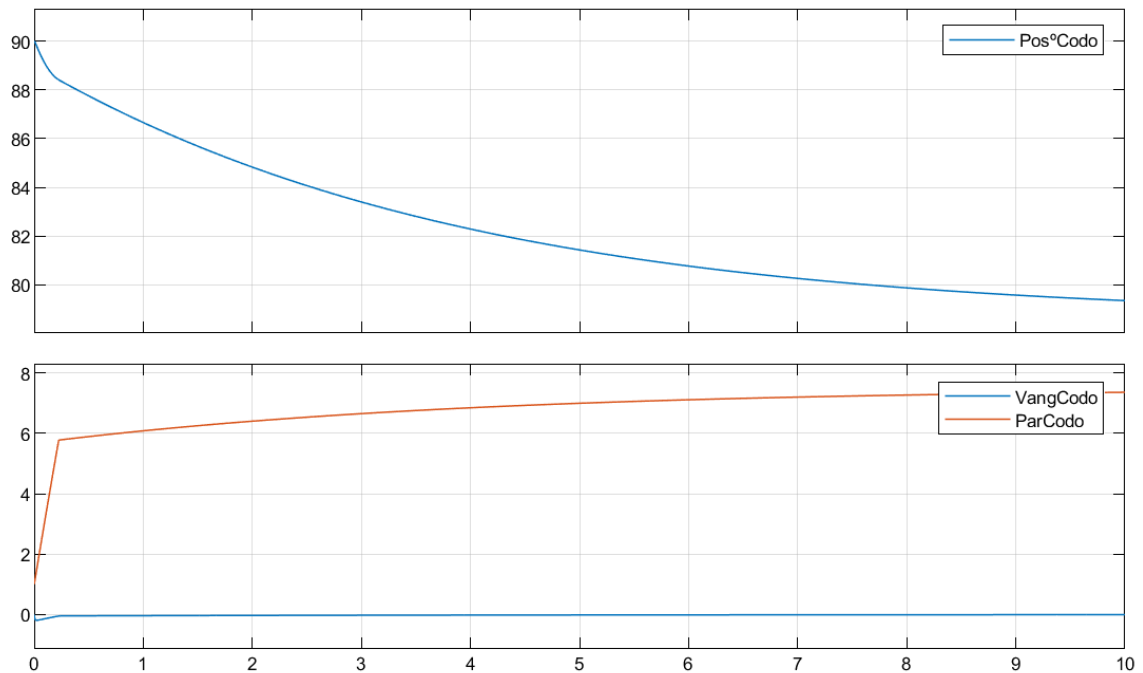


Figura 73 Grafica de reacción de los parámetros de posición, velocidad y par del sistema + SEA para una carga adicional de 4Kg

En este punto podemos ver algunas de las ventajas de los SEA, sacrificando precisión del valor que queremos mantener, el par de N*m adicionales que puede proporcionar el muelle puede permitir que mediante un bloquea de la posición se mantenga un par de oposición a la carga superior al que proporcionaría únicamente un motor rotacional que otorgue 5,5N*m

Por último realizaremos una prueba de cómo se comporta el sistema ante cargas variables en el tiempo, gracias a una masa variable y una señal senoidal de amplitud 3, para ver si puede provocar oscilaciones al variar entre una carga de 0Kg a una de 3Kg a una frecuencia de $\frac{\pi}{4}$.

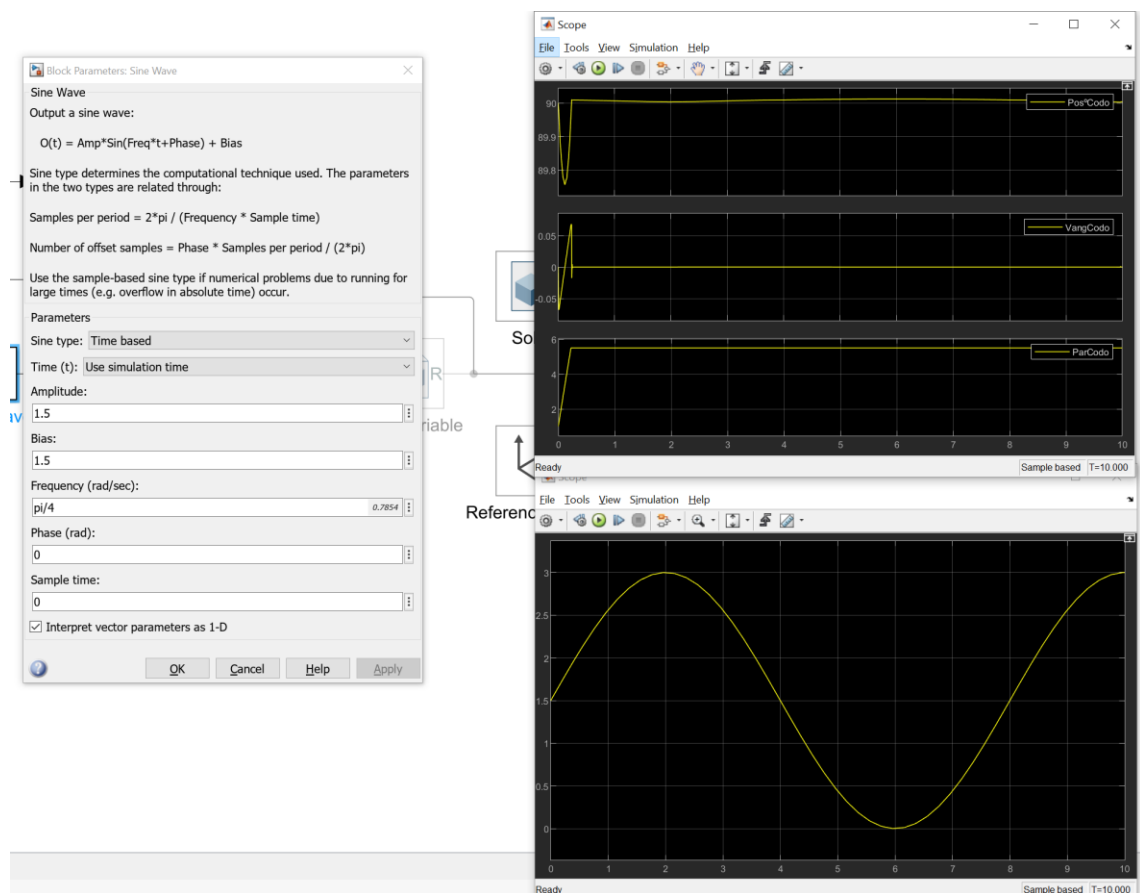


Figura 74 Reacción de los parámetros al incluir una masa variable con el tiempo (0-3Kg)

El muelle más amortiguador es lo suficientemente fuerte para los valores de más variable causando inestabilidad.

En un intento por ver la evolución, vamos a aumentar las cargas variables en él SEA para ver la evolución con la carga pico límite de 4 Kg.

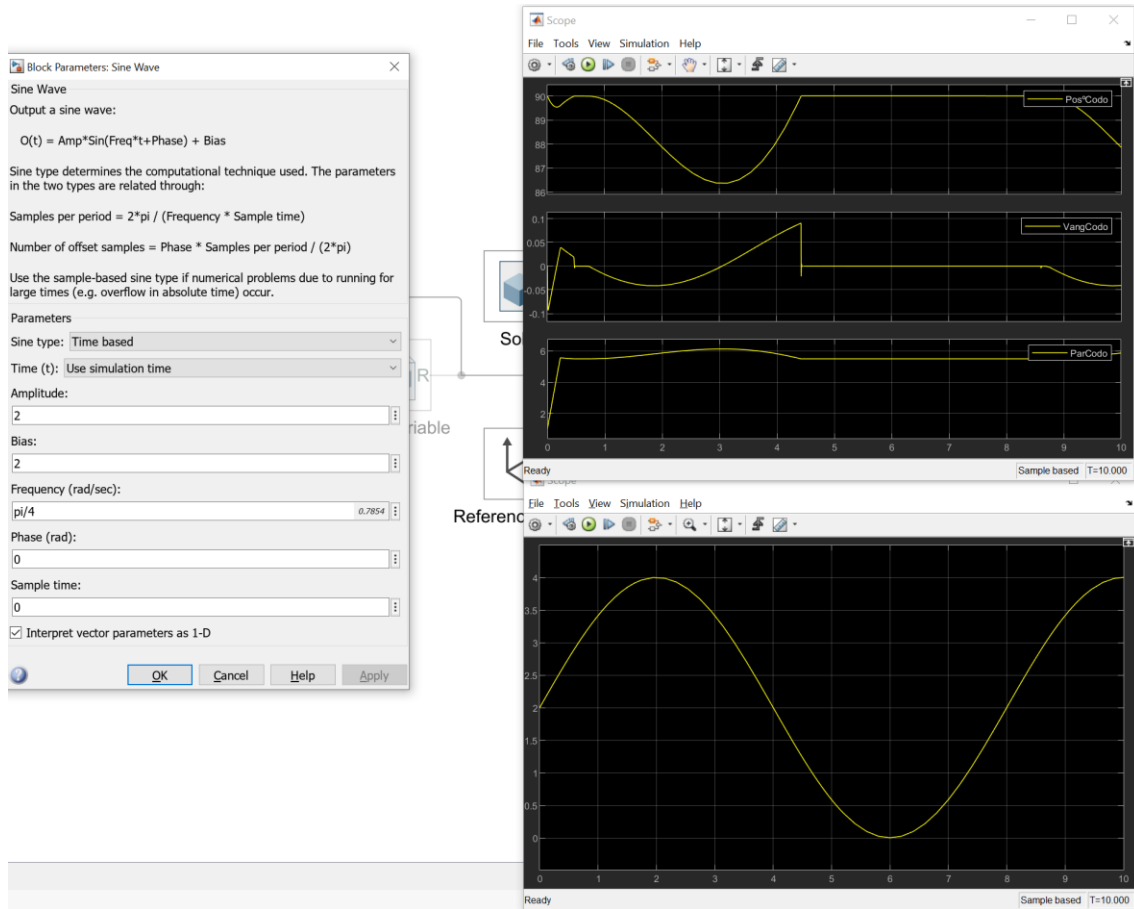


Figura 75 Reacción de los parámetros al incluir una masa variable con el tiempo (0-4Kg)
 peso limite

Se puede ver que el sistema se corrige bien ante la carga creciente, pero al sufrir el pico máximo, este pierde su posición y le cuesta recuperarla hasta más adelante cuando la carga sufrida disminuye.

Probablemente con un valor de par torsional dado por el muelle más alto la K del mismo podría permitir corregir ese problema a cambio de algo más de oscilación.

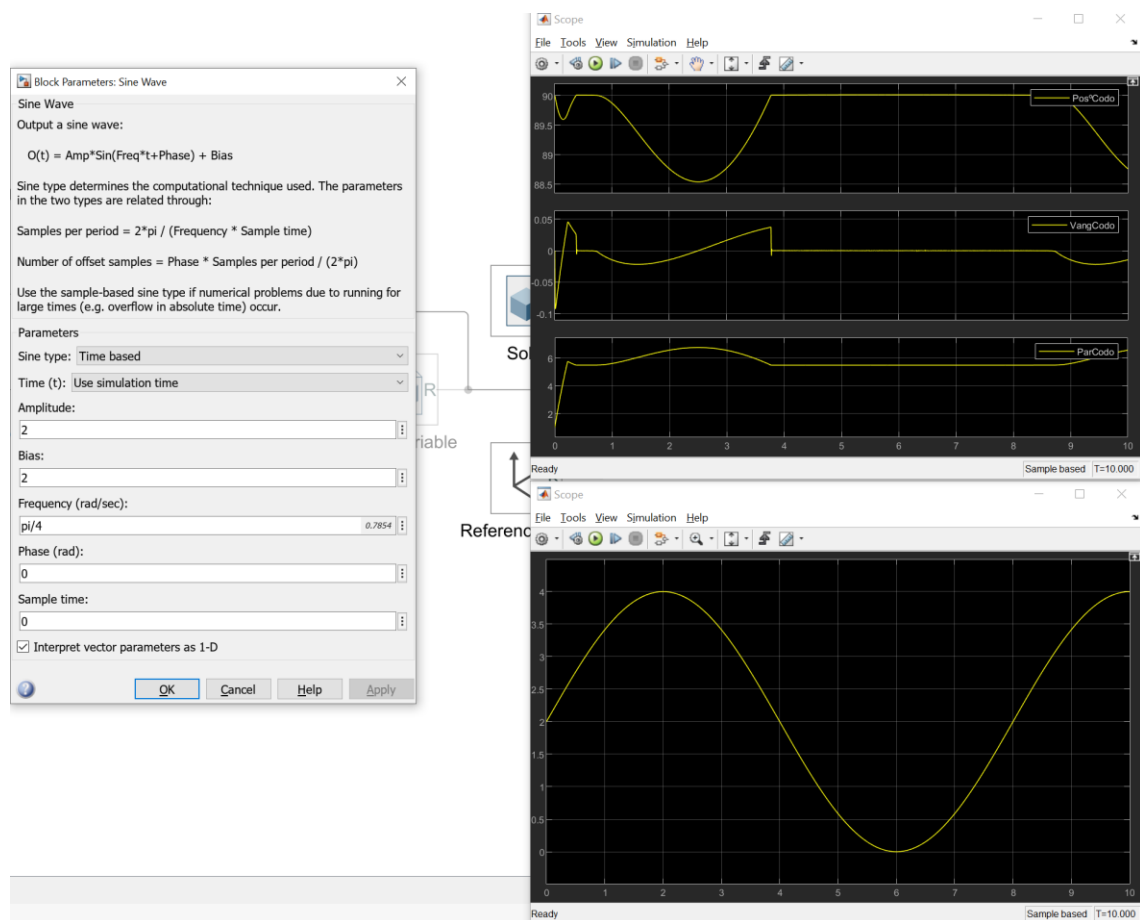


Figura 76 Comparación de los parámetros de posición, velocidad y par del sistema con muelle de ganancia x5

La respuesta mejora, la posición tiene 1º menos de error, sin embargo algunas sobreoscilaciones empeoran siendo más pronunciadas hasta que se estabilizan

Probablemente se pudiese remediar mediante un PID, pero la respuesta ante variaciones arbitrarias y oscilaciones también podría provocar efectos de windup o parecidos.

4.2 Sistema propuestos

El sistema propuesto sería una articulación simple con un motor con reductora asequible y de ser posible con un módulo de freno o la posibilidad de incluir un muelle para replicar el modelo de un SEA.

Para alcanzar este modelo se estudiará algunas opciones de electrónica incluyendo sensores y motores que puedan permitirnos realizar un sistema funcional y de un precio razonable.

4.3 Motores

4.3.1 Propuesta Ideal

Para los motores lo ideal sería el usar unos motores de corriente continua compactos y de tamaño pequeño, preferiblemente brushless, debido a su bajo desgaste y coste de mantenimiento como los motores flat del grupo Maxon que se muestra en la Figura 77.

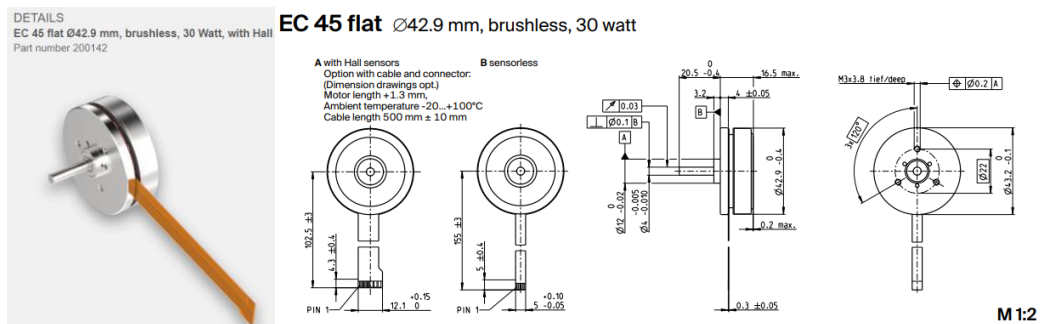


Figura 77 Ejemplo de motor de perfil plano de la empresa Maxon [27] ANEXO 1

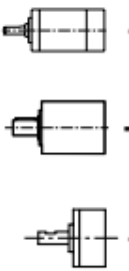
Este tipo de motores debido a su configuración aparte de ser de un tamaño manejable, permite montarle una serie de configuraciones sobre el eje del motor, algunas de ellas pueden ser reductoras con ratios de reducción muy variados como se ve en la Figura 78, en especial nos interesaría los de ratios de más de 1000:1 que nos ofrecen las reductoras planetarias que aparecen como compatibles mostrados en la Figura 79, pues como se ve en la Figura 80 el motor provee un par bastante bajo y muchas r.p.m. para un funcionamiento constante.

maxon Modular System Details on catalog page 46

Planetary Gearhead
 Ø32 mm
 0.75 - 6.0 Nm
 Page 394/398

Planetary Gearhead
 Ø42 mm
 3.0 - 15.0 Nm
 Page 407

Spur Gearhead
 Ø45 mm
 0.5 - 2.0 Nm
 Page 409



Recommended Electronics:

Notes Page 46

ESCON Module 24/2	500
ESCON 36/3 EC	501
ESCON Mod. 50/4 EC-S	501
ESCON Module 50/5	501
ESCON 50/5	503
DEC Module 24/2	505
DEC Module 50/5	505
EPOS4 Micro 24/5	509
EPOS4 Mod./Comp. 24/1.5	510
EPOS4 Mod./Comp. 50/5	510
EPOS4 Comp. 24/5 3-axes	511
EPOS4 50/5	515
EPOS4 Disk 60/8	516
EPOS2 P 24/5	520

for motor type A:
Encoder MILE
 256 - 2048 CPT,
 2 channels
 Page 460

Figura 78 Combinaciones de complementos para el motor

PART NO.	ARTICLE	TECHNICAL DATA				PRICE
		Ø	I	M	F	
166186	Planetary Gearhead GP 32 A Ø32 mm, 0.75 - 4.5 Nm, Metal Version	32 mm	1093 : 1	4.5 Nm		€246.73
166187	Planetary Gearhead GP 32 A Ø32 mm, 0.75 - 4.5 Nm, Metal Version	32 mm	1181 : 1	4.5 Nm		€268.20
166188	Planetary Gearhead GP 32 A Ø32 mm, 0.75 - 4.5 Nm, Metal Version	32 mm	1414 : 1	4.5 Nm		€268.20
166189	Planetary Gearhead GP 32 A Ø32 mm, 0.75 - 4.5 Nm, Metal Version	32 mm	1526 : 1	4.5 Nm		€268.20
166190	Planetary Gearhead GP 32 A Ø32 mm, 0.75 - 4.5 Nm, Metal Version	32 mm	1694 : 1	4.5 Nm		€268.20
166191	Planetary Gearhead GP 32 A Ø32 mm, 0.75 - 4.5 Nm, Metal Version	32 mm	1828 : 1	4.5 Nm		€268.20
166192	Planetary Gearhead GP 32 A Ø32 mm, 0.75 - 4.5 Nm, Metal Version	32 mm	1972 : 1	4.5 Nm		€268.20
166193	Planetary Gearhead GP 32 A Ø32 mm, 0.75 - 4.5 Nm, Metal Version	32 mm	2189 : 1	4.5 Nm		€268.20
166194	Planetary Gearhead GP 32 A Ø32 mm, 0.75 - 4.5 Nm, Metal Version	32 mm	2362 : 1	4.5 Nm		€268.20
166195	Planetary Gearhead GP 32 A Ø32 mm, 0.75 - 4.5 Nm, Metal Version	32 mm	2548 : 1	4.5 Nm		€268.20

Figura 79 Coste de reductores planetarios

		Part Numbers					
		200142	339281	339282	668555	668557	
		200189		339283		339284	
Motor Data Values at nominal voltage 1 Nominal voltage V 2 No load speed rpm 3 No load current mA 4 Nominal speed rpm 5 Nominal torque (max. continuous torque) mNm 6 Nominal current (max. continuous current) A 7 Stall torque ² mNm 8 Stall current A 9 Max. efficiency % Characteristics 10 Terminal resistance phase to phase Ω 11 Terminal inductance phase to phase mH 12 Torque constant mNm/A 13 Speed constant rpm/V 14 Speed/torque gradient rpm/mNm 15 Mechanical time constant ms 16 Rotor inertia gcm ²							
		12	12	24	24	36	36
		4370	4350	4360	4380	4750	4760
		163	163	81.4	73	61.6	55.3
		2940	2800	2940	2900	3290	3270
		55	54.7	54.8	55.2	66	66.6
		2.02	2.02	1.01	1.01	0.847	0.849
		255	219	253	243	380	369
		10	8.58	4.97	4.77	5.38	5.22
		76	75	76	77	80	81
		1.2	1.4	4.83	5.03	6.69	6.89
		0.56	0.56	2.24	2.24	4.29	4.29
		25.5	25.5	51	51	70.6	70.6
		374	374	187	187	135	135
		17.6	20.5	17.7	18.5	12.8	13.2
		171	19.9	17.2	17.9	12.4	12.8
		92.5	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5

Figura 80 Características de datos motor más información en ANEXO

También sería posible el desviarse de las configuración de que nos ofrece el fabricante del motor y tratar de montar sistemas de reductora de harmonic drive, que daría un par similar o superior en menos espacio, aunque habría que tener en cuenta el mayor coste que suelen suponer estos mecanismo.

Otros componentes de interés para el motor serian la sensorización del motor mediante un encoder, por ejemplo también le la Figura 78 (anterior), estos irían montado para tener una mayor precisión de la posición del motor y poder realizar un control dinámico de la posición. Sin embargo también suponen un coste adicional como se ve en la Figura 81.

PART NO.	ARTICLE	TECHNICAL DATA			PRICE
		PULSES/N	CHANNELS	LINE DRIVER	
673024	Encoder MILE, 256 cpt, 2-channel, with line driver	256	2	Yes	€145.57
673025	Encoder MILE, 512 cpt, 2-channel, with line driver	512	2	Yes	€145.57
673026	Encoder MILE, 1024 cpt, 2-channel, with line driver	1024	2	Yes	€145.57
673027	Encoder MILE, 2048 cpt, 2-channel, with line driver	2048	2	Yes	€145.57

Figura 81 Coste de enconder montables para motor escogido

Por último sería necesario un controlador o driver para que haga de interfaz entre el motor, la fuente de alimentación y nuestro sistema de control, aquí las características adicionales marcan también mucho el precio, la versión más barata tiene lo justo y necesario entrando dentro del margen de consumo del motor escogido como se ve en la Figura 82

PART NO.	ARTICLE	TECHNICAL DATA	PRICE
367661	DEC Module 24/2, digital 1-Q-EC Amplifier 24 V / 2 A, speed control, OEM module		€45.26
380200	DEC Module 50/5, digital 1-Q-EC Amplifier 50 V / 5 A, speed control, OEM module		€91.89
409510	ESCON 50/5, 4-Q Servocontroller for DC/EC motors, 5/15 A, 10 - 50 VDC		€283.99
414533	ESCON 36/3 EC, 4-Q Servocontroller for EC motors, 2.7/9 A, 10 - 36 VDC		€197.99
438725	ESCON Module 50/5, 4-Q Servocontroller for DC/EC motors, 5/15 A, 10 - 50 VDC		€189.78
466023	ESCON Module 24/2, 4-Q servo controller for DC/EC motors, 2/6 A, 10-24 VDC		€97.68
534130	EPOS4 Module 50/5, digital positioning controller, 5 A, 10 - 50 VDC		€376.83
536630	EPOS4 Module 24/1.5, digital positioning controller, 1.5 A, 10 - 24 VDC		€301.36
541718	EPOS4 Compact 50/5 CAN, digital positioning controller, 5 A, 10 - 50 VDC		€536.93
546047	EPOS4 50/5, digital positioning controller, 5 A, 10 - 50 VDC		€588.40

Figura 82 Precios controladores Maxon.

De esta forma un ejemplo de configuración de motor “ideal” que tenga la mayoría de los componentes necesarios para operar, sensorización de posición y una reductora para que junto con el motor escogido puedan dar salida hasta 15Nm de par quedaría un coste cercano a los 700€ como se ve en la Figura 83.






ORDER		×
<p>GEAR</p> 	<p>Planetary Gearhead GP 42 C Ø42 mm, 3 - 15 Nm, Ceramic Version Part number: 260554</p> <p>Price per unit: €387.46</p>	
<p>MOTOR</p> 	<p>EC 45 flat Ø42.9 mm, brushless, 30 Watt, with Hall sensors Part number: 200142</p> <p>Price per unit: €99.47</p>	
<p>SENSOR</p> 	<p>Encoder MILE, 512 cpt, 2-channel, with line driver Part number: 673025</p> <p>Price per unit: €145.57</p>	
<p>CONTROLLER</p> 	<p>DEC Module 24/2, digital 1-Q-EC Amplifier 24 V / 2 A, speed control, OEM module Part number: 367661</p> <p>Price per unit: €45.26</p>	
<p>ACCESSORY</p> 	<p>Adapter 8-pole flexprint connector to 8-pole screw terminal Part number: 425931</p> <p>Price per unit: €18.00</p>	
TOTAL COMBINATION:		€695.76

Figura 83 Combinación de un motor de alto par compacto y pequeño.

Debido al alto coste y para poder simular un prototipo más asequible se sustituirán este sistema por un servo motor de alto par de reducción, mucho más barato y con menos funcionalidades.

4.3.2 Propuesta de compromiso realista

Se decidió por un servomotor de alto par con control de posición de posición mediante señal PWM y con un cable adicional para obtener una señal analógica de la posición del motor dentro de lo 60° de movimiento que ofrece.

El motor es un CYS-S0650 55KG High Torque Servo como el que se muestra en la Figura 84.



Figura 84 Servo motor de alto par CYS-S0650

Y sus características recogidas en la hoja de especificaciones técnicas que viene en la Figura 85

Specification Sheet

Item No.	CYS-S0650
Type	Digital
Weight	202± 1 g
Size	66*30*56mm
Control System	(+)Pulse Width Control 1500usec Neutral
Operating Voltage	6.0~7.4Volts
Operating Temperature Range	(-)10 to +50 degree C
Operating Speed (6.0V)	0.13sec/60° at no load
Operating Speed (7.4V)	0.11sec/60° at no load
Stall Torque (6.0V)	48kg.cm
Stall Torque (7.4V)	55kg.cm
Operating Angle	45deg.one side pulse traveling 500 usec
360 Modifiable	No
Direction	Anticlockwise/Pulse Traveling 1000~2000usec
Current Drain (6.0V)	20mA/idle and 120mA no load operating
Current Drain (7.4V)	20mA/idle and 150mA no load operating
Stall Current	10A/13.4A
Dead Band Width	4usec
Motor Type	NdFeB motor
Bearing Type	Dual Ball Bearing
Horn gear spline	15T
Gear Type	Metal
Connector Wire Length	300mm
Wire info	Brown/Black = Negative
	Red = Positive
	Orange/White = Signal

Figura 85 Tabla características del Servomotor página fabricante CYS

El motor es menos eficiente en consumos, espacio, peso y otros aspectos pero tiene un coste reducido de 50€, por lo que no es una mala optativa.

Quedaría ver qué tal se comporta el motor a largo plazo bajo a trabajar en estado de alto par, ya que obliga muchas veces a trabajar fuera de la curva de trabajo diseñada para el motor dentro del servo (motor stall + alto amperaje), ya que puede alcanzar valores de hasta 13,4A en los picos de máxima carga

4.4 Sensores

Los sensores necesarios para el control del exoesqueleto así como información adicional como podría ser la posición del brazo, fuerza de la carga, esfuerzo de los músculos del brazo, etc.

4.4.1 Posición

Ambos sistemas de posición se encuentran dentro del servomotor.

El primero se encuentra en la electrónica del motor, siendo la entrada de a qué posición debería moverse el servo la señal PWM.

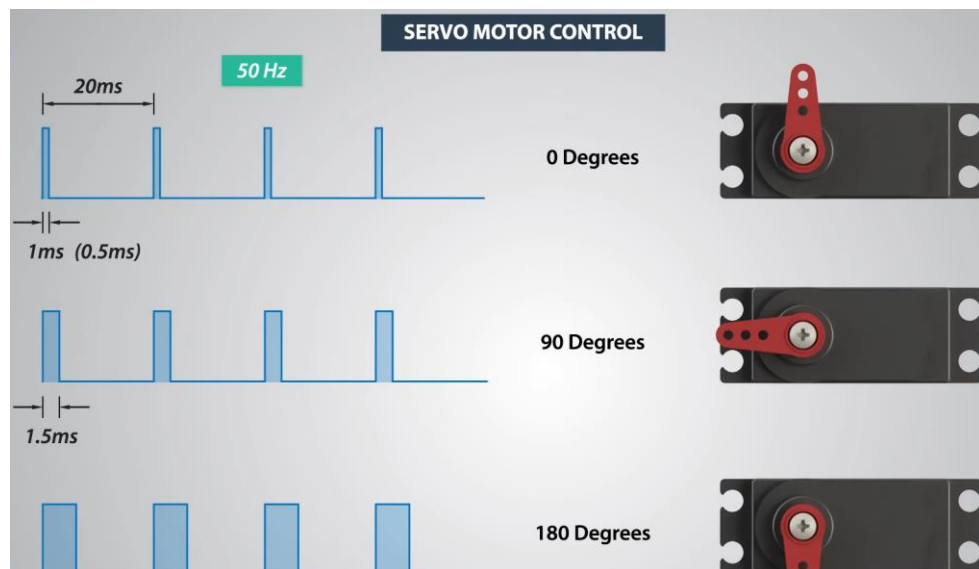


Figura 86 Diagrama explicativo PWM de How to Mechatronics [28]

La señal de PWM pasa por un la electrónica interna del servo donde compara la corriente que genera esta señal, con la corriente que circula por un potenciómetro incorporado a la salida final del juego de engranajes del servo.

De ser la señal de entrada mayor que la del potenciómetro, el motor se desplazará hasta igualar ambos valores en el circuito comparador del servo, de ser la señal de entrada menor que el valor del potenciómetro el motor se moverá en sentido opuesto hasta igualar de nuevos las señales.

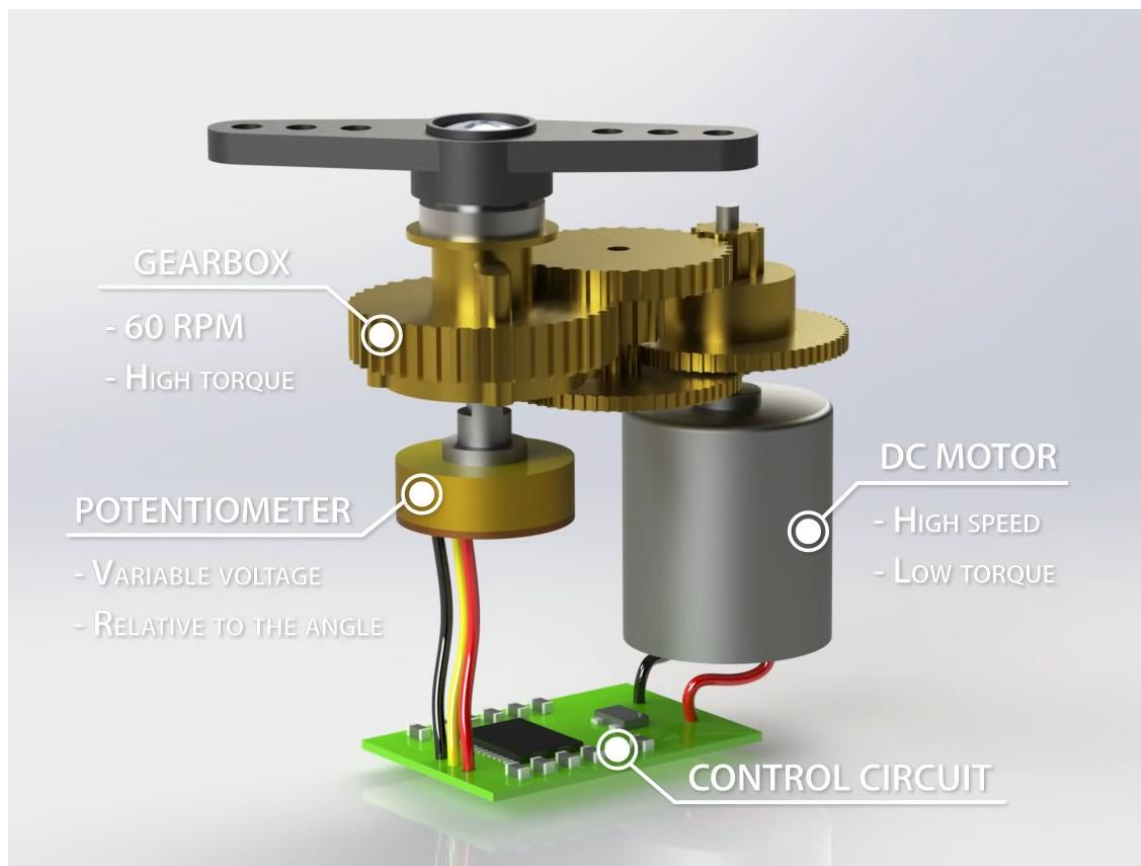


Figura 87 Diagrama explicativo PWM de How to Mechatronics [28]

Este circuito realimentado permite un buen control de posición con pocos elementos, pero puede contener pequeños errores de posición debido a factores externos o a los valores de histéresis que evitan sobre oscilación en un intento de corregir la posición del servo.

Por esta razón el servo incluye una salida adicional que corresponde a una salida analógica del potenciómetro en el interior del servo, permitiendo tener lectura directa de la posición para mejorar el control o utilizar esta información para otras funciones como podría ser limitaciones del ángulo de giro o evitar offsets de la posición real del servomotor.

4.4.2 Fuerza

El sensor de fuerza está compuesto por una célula de carga tal220 10kg HT.

Este sensor es un puente de Wheatstone que tiene 2 pares de galgas cuya resistencia varia ante la deformación física que sufre la célula al ser comprimida/traccionada en la dirección para la cual está diseñada

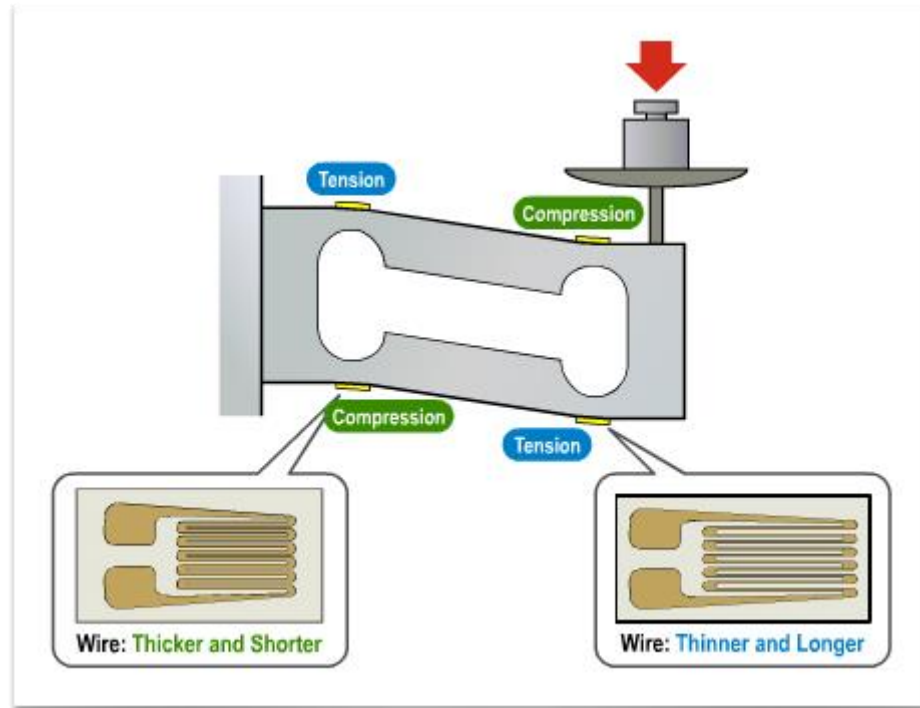
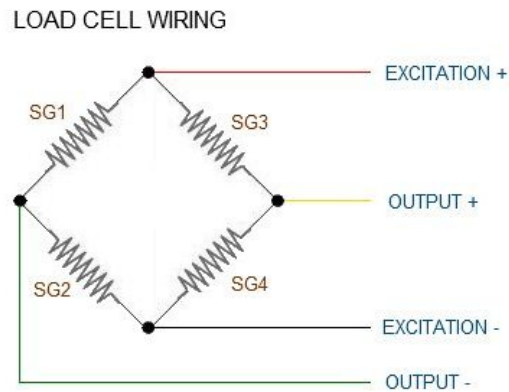


Figura 88 Diagrama ilustrativo del funcionamiento de una célula de carga [29]

Esto genera variaciones en las resistencias de la en el puente de Wheatstone de la célula pudiendo cuantificar la fuerza ejercida sobre la célula y su dirección al comparar las variaciones de corriente y voltaje a la salida del circuito (causadas por la variación de las resistencia internas de las galgas)



Four strain gauges (SG1 through 4) hooked up in a wheatstone bridge formation

The four wires coming out from the wheatstone bridge on the load cell are "usually":

Wheatstone Bridge Node	"Typical" Wire Color
Excitation+ (E+) or VCC	RED
Excitation- (E-) or GND	BLACK or YELLOW
Output- (O-), Signal- (S-), or Amplifier- (A-)	WHITE
O+, S+, or A+	GREEN or BLUE

Figura 89 Diagrama de un puente de Wheatstone proveído por el fabricante [29]

Sin embargo estas variaciones son muy pequeñas y es necesario el usar amplificadores para obtener unos valores cuya resolución podamos captar y diferenciar.

Aquí es donde entra un amplificador como el INA125 de Texas Instruments

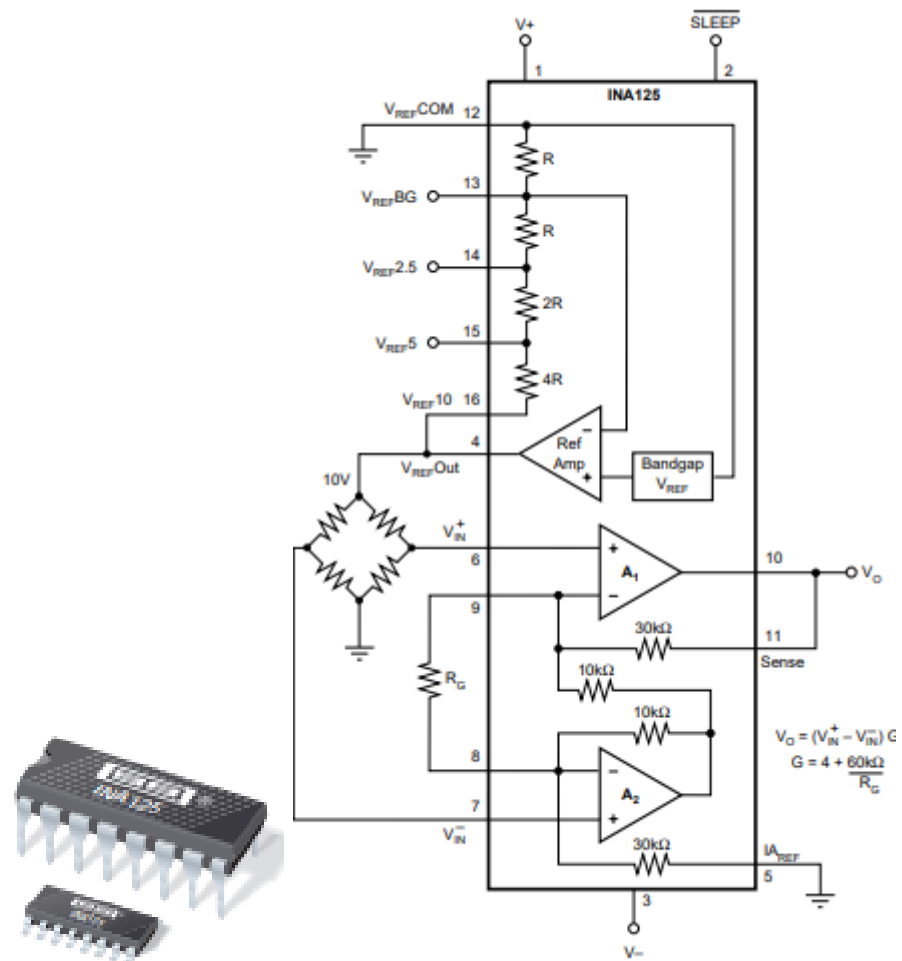


Figura 90 Diagrama datasheet INA125 Texas Instruments

SU configuración interna permite ampliar señales de un puente de Wheatstone en el rango de nano voltios a valores más legibles de 1,24V hasta los 10 V, dependiendo de la configuración dada y todo ello con un consumo ínfimo apenas llegando a los 5mA.

De esta forma se podría configurar de la siguiente manera para su lectura con una placa de Arduino para tener valores de lectura

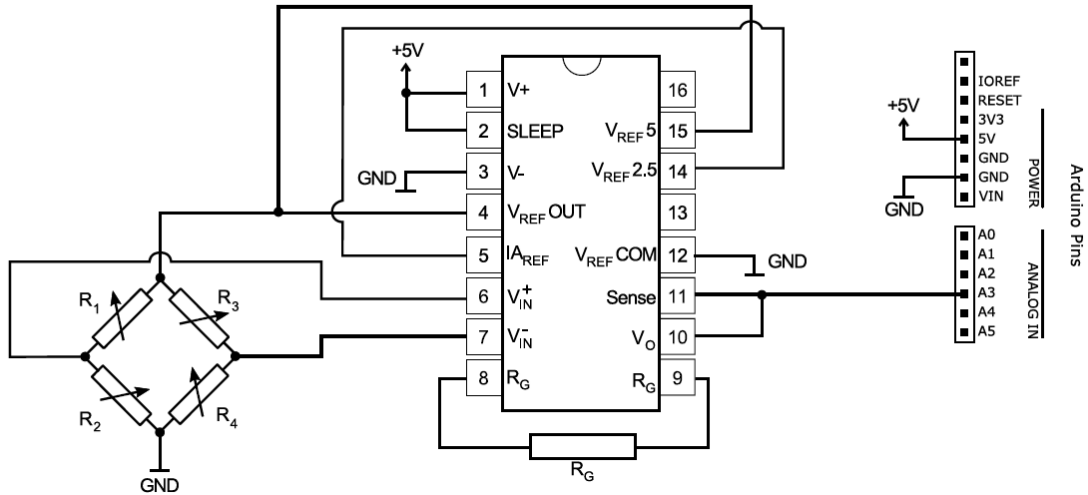


Figura 91 Diagrama de conexión al encapsulado Texas Instruments

De esta manera podemos obtener la tabla de valores del datasheet del fabricante para la lectura de nuestro sensor.

SPECIFICATIONS: $V_S = +5V$

At $T_A = +25^\circ C$, $V_S = +5V$, I_A common at $V_S/2$, V_{REF} common = $V_S/2$, $V_{CM} = V_S/2$, and $R_L = 10k\Omega$ to $V_S/2$, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	INA125P, U			INA125PA, UA			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
INPUT								
Offset Voltage, RTI			± 75	± 500		*	± 750	μV
Initial vs Temperature			± 0.25			*		$\mu V/^\circ C$
vs Power Supply	$V_S = +2.7V$ to $+36V$		3	20		*	50	$\mu V/V$
Input Voltage Range			See Text			*		
Common-Mode Rejection	$V_{CM} = +1.1V$ to $+3.6V$							
	G = 4	78	84		72	*		dB
	G = 10	86	94		80	*		dB
	G = 100	100	114		90	*		dB
	G = 500	100	114		90	*		dB
GAIN								
Gain Error	$V_O = +0.3V$ to $+3.8V$ G = 4		± 0.01			*		%
OUTPUT								
Voltage, Positive			$(V^+) - 1.2$		*	*		V
Negative			$(V^-) + 0.3$		*	*		V
POWER SUPPLY								
Specified Operating Voltage			+5		*	*		V
Operating Voltage Range				+36	*	*		V
Quiescent Current	$I_O = I_{REF} = 0mA$		460	525	*	*		μA
Sleep Current ($V_{SLEEP} \leq 100mV$)	$R_L = 10k\Omega$, Ref Load = $2k\Omega$		± 1	± 25	*	*		μA

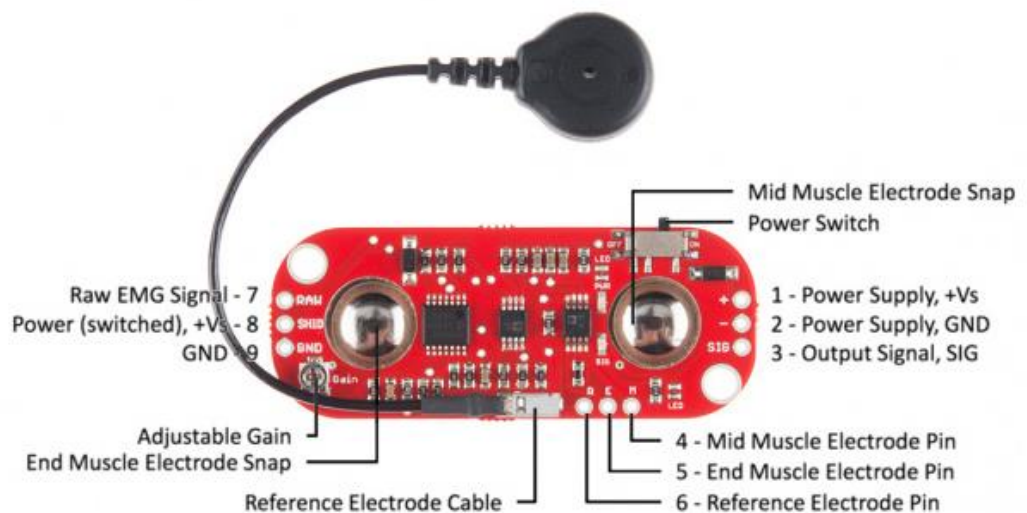
* Specification same as INA125P, U.

Figura 92 Tabla valores funcionamiento INA125

4.4.3 Esfuerzo

El sensor que usaremos es un MyoWare 1.0 muscle, este es un pequeño sensor de electromiografías (52mm x 13mm), lo cual nos permite cuantificar las señales eléctricas que se dirigen hacia los músculos al realizar un esfuerzo con ellos.

Con alimentación y el uso de unos electrodos es posible mandar una señal analógica a nuestro sistema de control de la medida de esfuerzo que realizan nuestros musculo.



MyoWare sensor layout

Figura 93 Desglosado de partes del MyoWare datasheet fabricante [30]

Su uso requiere de decidir de que grupo de músculos se quiere tomar lectura, el buen posicionamiento de los electrodos y del tratamiento de la señal de salida obtenida.

Why is electrode placement important?

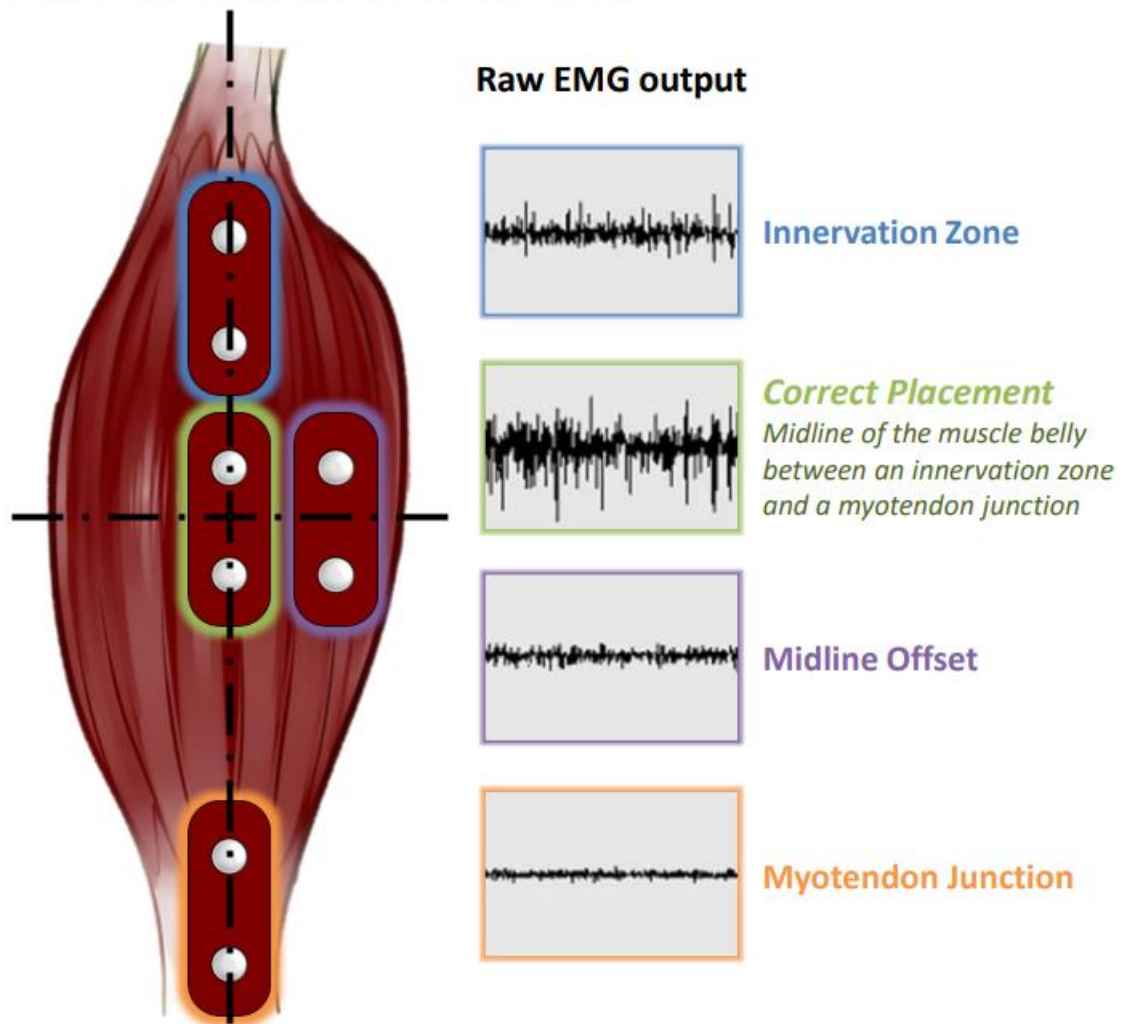


Figura 94 Explicación de posicionamiento para lectura datasheet MyoWare [30]

La orientación y posición del sensor (respecto a las fibras del musculo) afecta a la cantidad y calidad de las señales, por ello es importante limpiar la zona donde se posiciona los electrodos con el fin de tomar valores y evitar ruido y otras interferencias en la señal

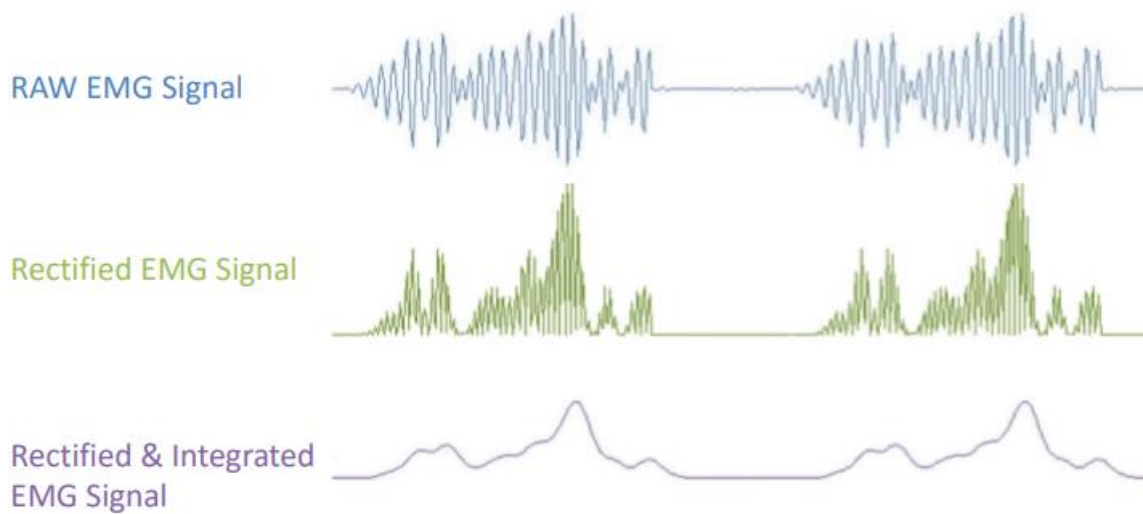


Figura 95 Filtrado de lecturas de la señal del sensor MyoWare [30]

La disposición del circuito también puede ayudar a aislar la señal de llegada a el sistema de control

Setup Configurations *(Arduino is shown but MyoWare is compatible with most development boards)*

a) Battery powered with isolation via no direct external connections

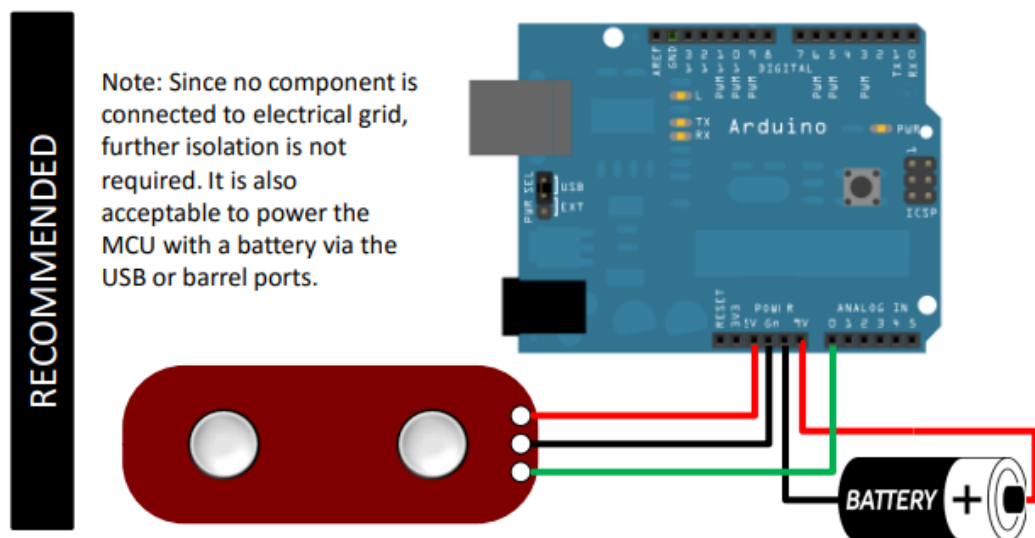


Figura 96 Alimentación y cableado recomendado por el fabricante [30]

4.5 Electrónica de control

La lógica del sistema necesita estar controlada por una placa en la que podamos procesar los datos recogidos, procesarlos y escoger las señales de salida adecuadas para la situación que queremos obtener.

Debido a la naturaleza del proyecto nos interesa el uso de placas electrónicas en particular aquellas que tengan un formato compacto y consumos de energía reducido. Por ello se ha reducido a las siguientes posibles opciones el candidato para el control del sistema propuesto.

4.5.1 Arduino Nano

El Arduino nano 33 IoT, mostrada en la Figura 97 , con 18 mm de ancho por 45 mm de largo y pesando solo 5 g está dentro de la gama de placas más compactas que ofrece Arduino.



Figura 97 Arduino nano 33 IoT [31]

Tiene un procesador ARM Cortex M0+SAMD21 de 32 bits con una frecuencia de reloj de 48MHz.

Este Arduino Nano tiene por memoria:

- Procesador
 - 256KB SRAM
 - 1MB de memoria flash
- Módulo de memoria adicional
 - 448 KB ROM
 - 520 KB SRAM
 - 2 MB de memoria flash

Por lo que debería ser suficiente para cargar programas de un tamaño medio e incluso recolectar algunos datos adicionales en memoria.

El Arduino Nano 33 IoT es una placa orientada para IoT, razón por la cual tiene un pequeño tamaño, bajos consumos y además tiene módulos adicionales como:

- Wifi
- Bluetooth (regular y de bajo consumo)
- IMU de 6 ejes

La placa se puede alimentar con un rango de entre 3,3V hasta 18V con un consumo de entre 25 mAh hasta 85 mAh, estos número podrían reducirse más eliminando algunos de los módulos del Arduino Nano, pero al ser un consumo bajo comparado con el consumo que realizara el motor, se consideró que era aceptable.

4.5.1.1 Entradas y salida

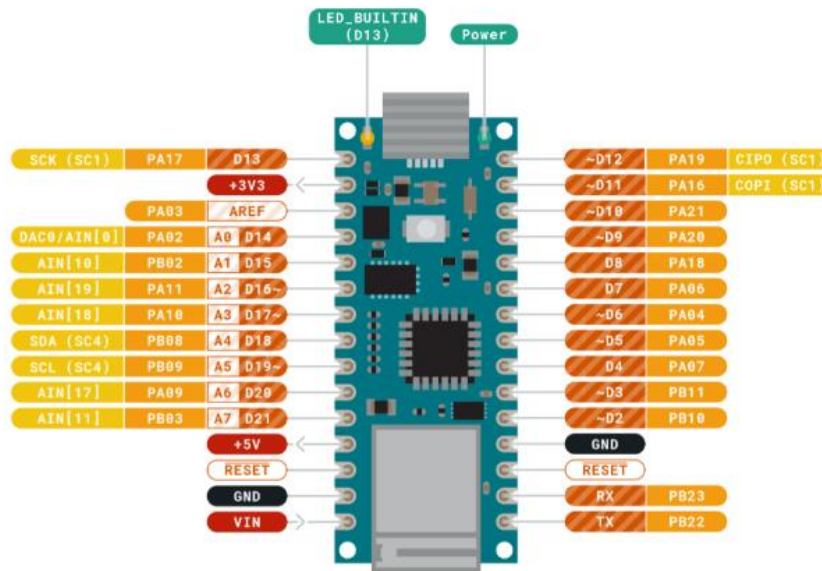
Arduino Nano cuenta con:

- Entrada USB para alimentación y programación
- 14 entradas/salidas digitales configurable
 - Todas funcionan a 3,3V a diferencia de otras placas
 - 5 de ellas permiten salidas de PWM
 - Comunicación I2C, SPI y UART
 - Output de corriente de 7mA
- 8 entradas analógicas
- 1 salida analógica
- 3 pines de alimentación (1 entrada de alimentación, 2 de salida de alimentación)
- 2 pines de tierra (GND)

Además algunos de los pines anteriores permiten ser usados para protocolos específicos de comunicación o el uso de PWM en la salida de la señal digital.



**ARDUINO
 NANO 33 IoT**



Ground	Internal Pin	Digital Pin	Microcontroller's Port
Power	SWD Pin	Analog Pin	
LED	Other Pin	Default	

ARDUINO . CC

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1888, Mountain View, CA 94041, USA.

Figura 98 Pinout de Arduino Nano 33 lot [31]

A continuación se muestra la configuración posible de cada uno de los pines.

5.2 Headers

The board exposes two 15 pin connectors which can either be assembled with pin headers or soldered through castellated vias.

Pin	Function	Type	Description
1	D13	Digital	GPIO
2	+3V3	Power Out	Internally generated power output to external devices
3	AREF	Analog	Analog Reference; can be used as GPIO
4	A0/DAC0	Analog	ADC in/DAC out; can be used as GPIO
5	A1	Analog	ADC in; can be used as GPIO
6	A2	Analog	ADC in; can be used as GPIO
7	A3	Analog	ADC in; can be used as GPIO
8	A4/SDA	Analog	ADC in; I2C SDA; Can be used as GPIO (1)
9	A5/SCL	Analog	ADC in; I2C SCL; Can be used as GPIO (1)
10	A6	Analog	ADC in; can be used as GPIO
11	A7	Analog	ADC in; can be used as GPIO
12	VUSB	Power In/Out	Normally NC, can be connected to VUSB pin of the USB connector by shorting a jumper
13	RST	Digital In	Active low reset input (duplicate of pin 18)
14	GND	Power	Power Ground
15	VIN	Power In	Vin Power input
16	TX	Digital	USART TX; can be used as GPIO
17	RX	Digital	USART RX; can be used as GPIO
18	RST	Digital	Active low reset input (duplicate of pin 13)
19	GND	Power	Power Ground
20	D2	Digital	GPIO
21	D3/PWM	Digital	GPIO; can be used as PWM
22	D4	Digital	GPIO
23	D5/PWM	Digital	GPIO; can be used as PWM
24	D6/PWM	Digital	GPIO, can be used as PWM
25	D7	Digital	GPIO
26	D8	Digital	GPIO
27	D9/PWM	Digital	GPIO; can be used as PWM
28	D10/PWM	Digital	GPIO; can be used as PWM
29	D11/MOSI	Digital	SPI MOSI; can be used as GPIO
30	D12/MISO	Digital	SPI MISO; can be used as GPIO

Tabla 2 Funciones de cada pin en Arduino Nano [31] ANEXO 2

4.5.1.2 Programación

La programación del Arduino se hace escribiendo código C en el IDE (entorno de desarrollo integrado) de Arduino, para a posteriori generar y subir un sketch o script que se cargara dentro de la memoria flash del Arduino y que este ejecutara desde su puesta en marcha.

Dentro de este código que se guarda en la memoria no volátil del Arduino se incluyen las funciones de uso recurrente, inicialización del Arduino y todas las librerías que sean necesarias para el uso que se le va a dar.

Como el IDE es común a todas las placas de Arduino y algunas otras de código abierto es necesario seleccionar el puerto de conexión y para que placa se compilara el código a enviar como se ve en la Figura 99 y Figura 100.

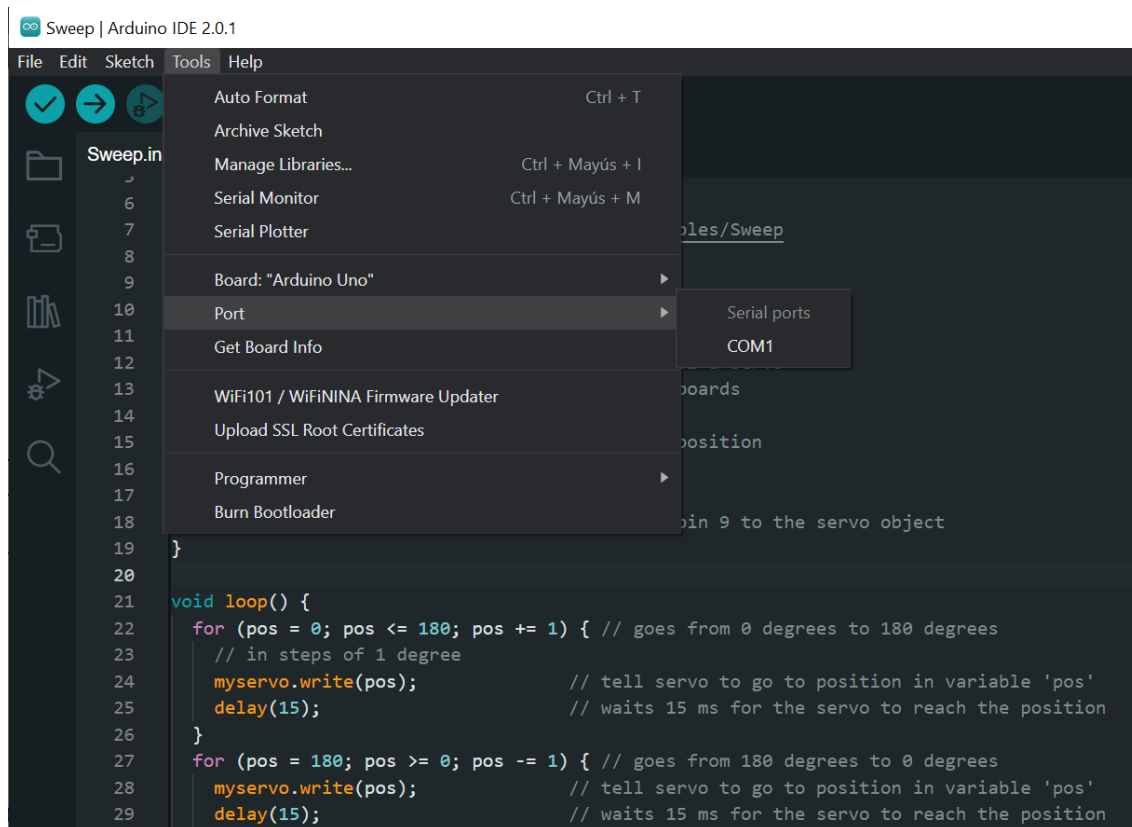


Figura 99 Configuración del IDE de Arduino selección puerto

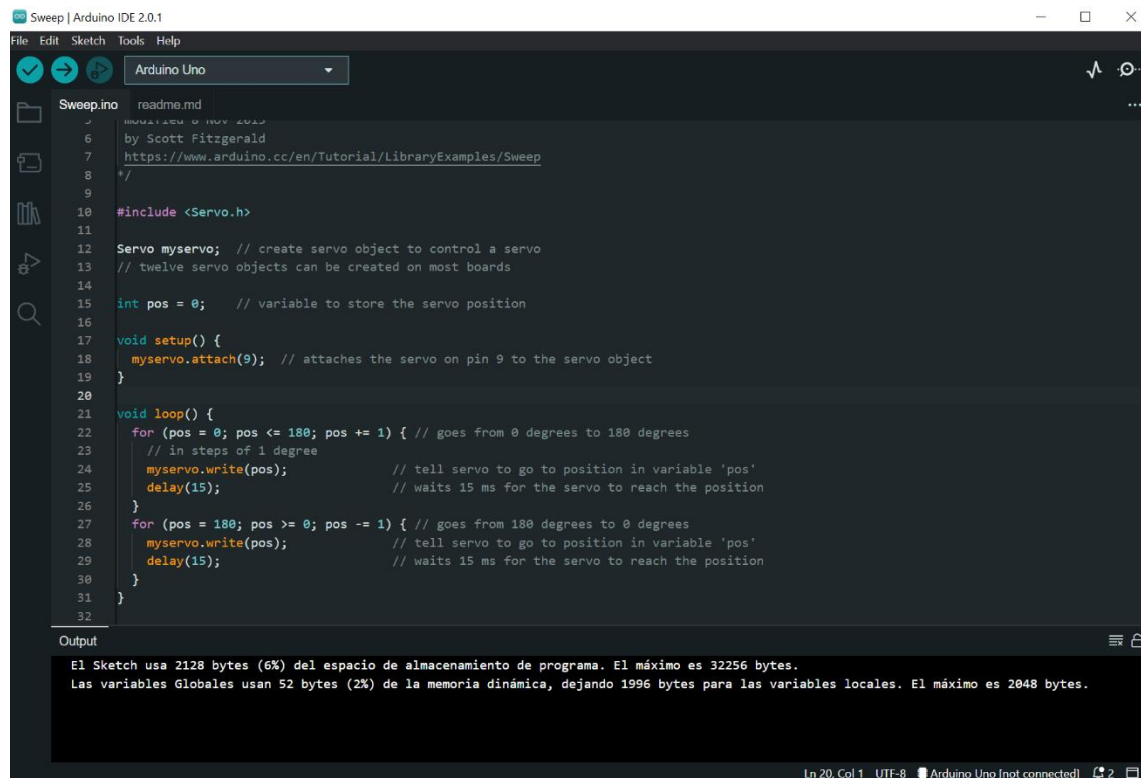


Figura 100 Selección placa en el IDE

4.5.2 Raspberry

La Raspberry Pi es una plataforma computacional de código abierto gestionada por la Raspberry Foundation. Su funcionamiento se basa en procesadores de arquitectura ARM y un sistema operativo basado en Linux y sus muchas distribuciones (Distros) de las que hay más de 30 variedades, la mayoría de ellas son software de libre desarrollo, gratuito y cada una tiene sus propias particularidades e interfaces.

Raspberry Pi también cuenta con varios productos de MCU y SBC, no solo varían en tamaño, sino también en configuraciones de memorias, módulos de comunicación y modelos alternativos con distintas prestaciones según fue evolucionando estos sistemas a lo largo del tiempo.

De las versiones más completas de Raspberry Pi con la última versión la Raspberry Pi 4b siendo una de las placas más populares para el desarrollo de proyectos de electrónica.

Mientras que en la sección de soluciones más ligeras y menor capacidad de computación están las Raspberry Pi Pico, MCU muy similares a los Arduino siendo versiones mucho más pequeñas y baratas de la Raspberry Pi pero con muchas limitaciones en hardware y otras capacidades como las interfaces, tipos de comunicación, etc..

La Raspberry Pi Zero 2 W es una de las versiones más compactas y potentes de Raspberry, SBU que tiene la ventaja añadida de ser un pequeño ordenador con un sistema operativo y una unidad de almacenamiento más grande y flexible, funciona de la misma manera que lo haría un pequeño ordenador, por una fracción del precio.

En un principio se descartó la Raspberry Pi Zero 2 W, que aunque más potente y con mayor flexibilidad de uso, tiene algunas carencias de hardware , que requerirían añadir módulos como DACs para la recepción de señales analógicas, los cuales están ya disponibles en el hardware de las Raspberry Pico, de menor precio y sin contar la necesidad de estos módulos adicionales.

La Raspberry Pi Pico W, como se ve en la Figura 101, es una pequeña placa microcontroladora de 21 mm de ancho por 51 mm de largo con un peso alrededor de los 4 g.

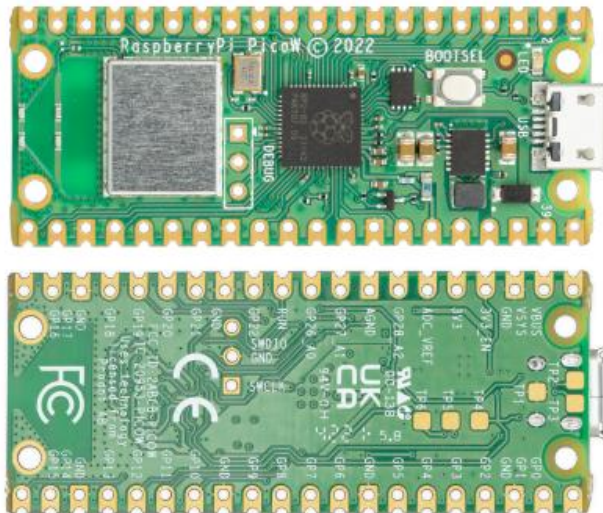


Figura 101 Raspberry Pi Pico

Tiene un procesador Dual-core ARM Cortex M0+ con una frecuencia de reloj de 133 MHz.

Esta Raspberry Pico tiene por memoria:

- Procesador
 - 264 KB SRAM
- Módulo de memoria adicional
 - 2 MB de memoria flash

No debería haber problemas para el almacenamiento de programas sencillos de control en estas

La Raspberry Pico W es una placa orientada para IoT también, razón por la cual tiene un pequeño tamaño, bajos consumos y además tiene módulos adicionales como:

- Wifi
- Bluetooth (regular y de bajo consumo)

La placa se puede alimentar con un rango de entre 3,3V hasta 5,5V con un consumo de entre 50 mAh hasta 90 mAh, estos número

4.5.2.1 Entradas y salidas

La Raspberry Pico W cuenta con:

- Entrada USB para alimentación y programación
- De los 40 pines que tiene 26 son entradas/salidas digitales configurable GPIO
 - Todas funcionan a 3,3V
 - 16 de ellas permiten salidas de PWM
 - Comunicación I2C, SPI y UART
 - Output de corriente de 2-12mA configurable (4mA predeterminado)
 - 3 entradas digitales configurables para señales analógicas
- 3 pines de alimentación (1 entrada de alimentación, 2 de salida de alimentación)
- 8 pines de tierra (GND)

Raspberry Pi Pico Pinout

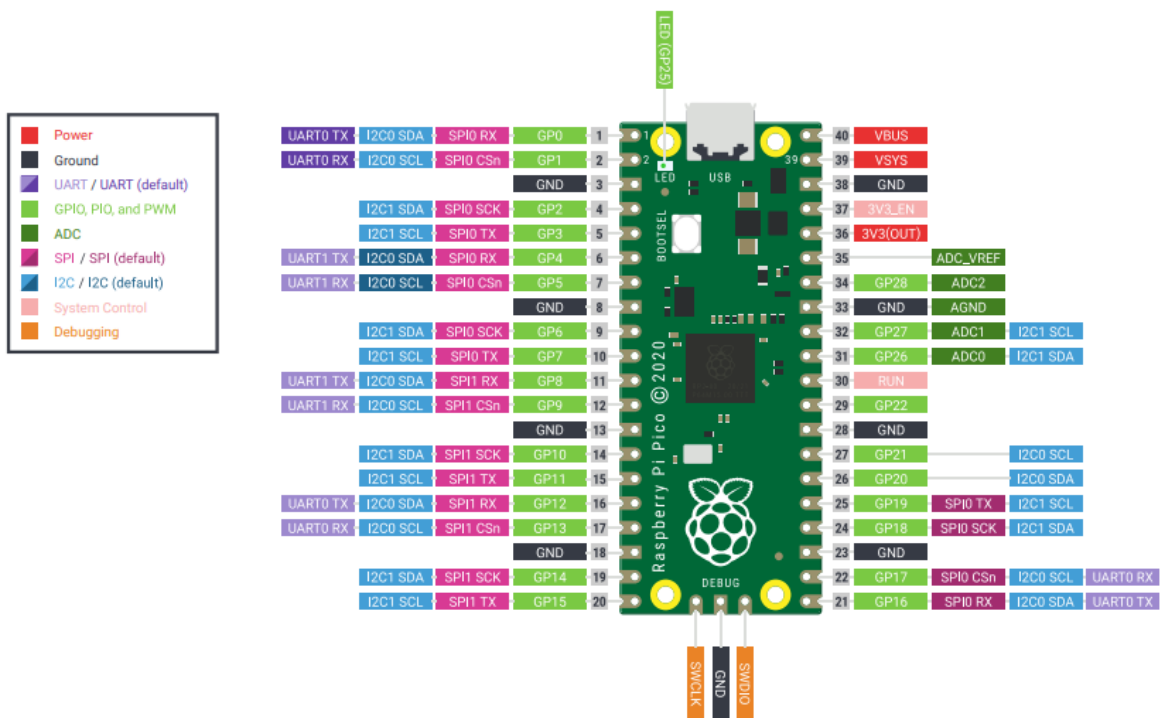


Figura 102 Pinout de la Raspberry Pi Pico

4.5.2.2 Programación

La programación de la Raspberry Pi Pico W es similar al de Arduino, lo único que en vez de tener un IDE y cargar los programas a continuación, es necesario el uso de un firmware instalado en la Raspberry Pi Pico W además de tener el SDK de C o Python correspondiente para realizar el programa y su compilación.

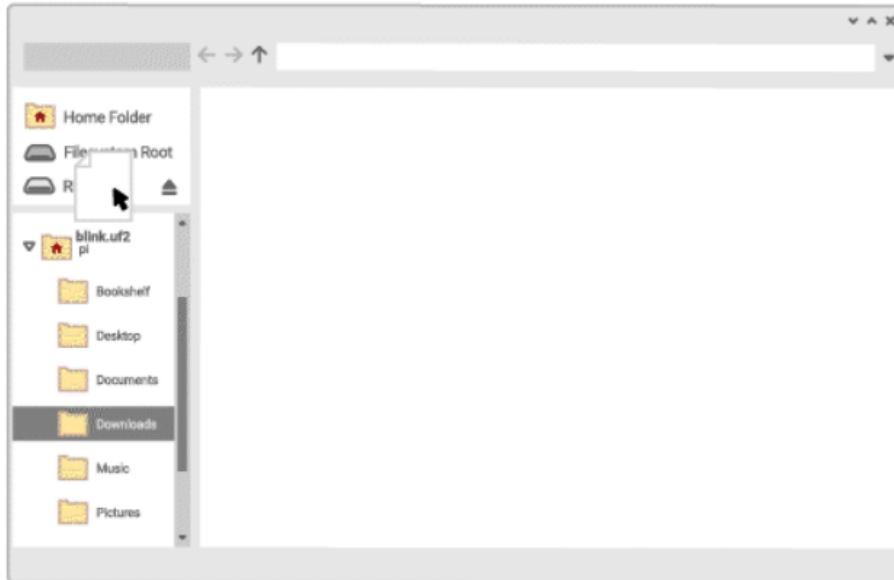


Figura 103 Programación drag and drop Raspberry Pi Pico W

Una vez terminado, es posible simplemente arrastrar el archivo de programación al dispositivo y este es cargado en la memoria para ser a continuación ejecutado.

También es posible usando un IDE de Python el tener una sesión activa de un programa y a posteriori enviar dicho script a la placa.

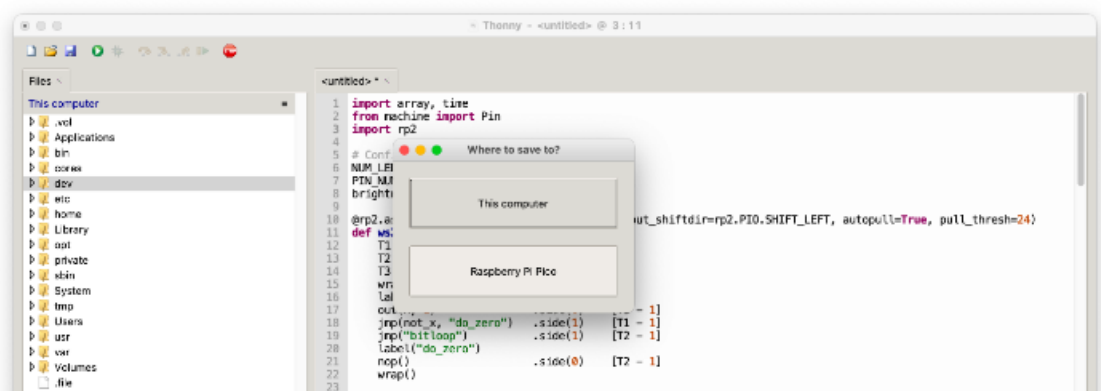


Figura 104 Programación en IDE para Raspberry Pi Pico W

Comparativamente el entorno de la Raspberry Pi Pico W es un poco menos intuitivo que el de Arduino, especialmente en algunos aspectos de interfaces, ya que es común en Raspberry la necesidad e introducir en la consola de comandos la descarga de librerías, firmware y la activación de ciertos parámetros de activación.

Probablemente por ello Arduino sea una solución más sencilla y amigable a la hora de desarrollar.

4.6 Alimentación y consumos

Al ser un sistema portátil es necesario el tener una fuente de alimentación portátil que pueda otorgar suficiente potencia como para mantener el sistema en funcionamiento.

Como se puede ver en la Tabla 3, el consumo individual de todos los componentes que incluye nuestro sistema

Nombre	Voltaje	Consumo idle (mAh)	Consumo pico (mAh)	Consumo total idle (Wh)	Consumo total pico (Wh)
Servomotor CYS-S0650	7,4	150	10000	1,11	74
Arduino Nano	3,3	25	85	0,025	0,2805
Célula de carga tal220 10k HT sensor	3,3	0	0	0	0
Amplificador INA125PA	3,3	5	5	0,025	0,025
MyoWare 1.0 muscle sensor	3,3	9	14	0,045	0,07
Total		189 mAh	10104 mAh	1,2387 Wh	74,3432 Wh

Tabla 3 Lista de voltajes y consumos componentes electrónicos (estudios propios basados en datasheets de los componentes)

Con estos consumos en mente, es necesario ver que baterías cumplen con las necesidades para permitir a la electrónica trabajar correctamente y durante el tiempo que creamos necesario.

4.6.1 Carga y duración del trabajo

Actualmente necesitamos una batería de al menos 7,4V de tensión para alimentar el servomotor el cual necesita un rango de entre 6V hasta 7,4V.

Respecto a la capacidad depende del tiempo que necesitemos que la electrónica esté operativa.

Por ejemplo una batería LiPo de 7,4V y 1500 mAh de capacidad proveerán unos 11,1 Wh de potencia. Esto significa que para un consumo idle (funcionamiento sin cargas) tendremos:

$$\frac{11,1 \text{ Wh}}{1,2387 \text{ Wh}} = 8.96 \approx 8 \text{ horas}$$

Para un consumo de pico suponiendo que la batería tiene al menos una tasa de descarga que permita mandar los casi 10 A sería:

$$\frac{11,1 \text{ Wh}}{74.3432 \text{ Wh}} = 0,143 \approx 8 \text{ minutos}$$

Por último un término más razonable para un consumo medio que suponga una carga que sea la mitad de la capacidad máxima del servo (22,5Kg*cm) alrededor de 5 Kg en una de las extremidades y suponiendo una curva de consumos más lineal sería:

$$\frac{11,1 \text{ Wh}}{30.3432 \text{ Wh}} = 0,3658 \approx 21 \text{ minutos}$$

Estos valores son escalables, una mayor batería otorgaría más horas de uso del sistema, lo que permitiría reducir la necesidad de recargar las baterías entre usos.

Batería LiPo (Polímero de Litio)



Figura 105 Batería LiPo ligera de baja capacidad (página del vendedor Zeee)

Por otro lado hay batería de mayor capacidad, con carcasas rígidas que dan una mayor protección ante impactos a cambio de un mayor peso



	50C 5000mAh 2S Deans	50C 5200mAh 2S T	50C 6500mAh 2S T	50C 7200mAh 2S T	50C 8000mAh 2S T
Voltaje (V):	7,4 V.	7,4 V.	7,4 V.	7,4 V.	7,4 V.
Tasa de descarga (C):	50 C.	50 C.	50 C.	50 C.	50 C.
Capacidad (mAh):	5000 mAh.	5200 mAh.	6500 mAh.	7200 mAh.	8000 mAh.
Dimensiones (mm):	137 x 46 x 24 mm.	137 x 46 x 24 mm.	137 x 46 x 24 mm.	137 x 46 x 24 mm.	137 x 46 x 24 mm.
Peso (g)	240 g.	245 g.	288 g.	298 g.	305 g.
Enchufe.	Deans T	Deans T	Deans T	Deans T	Deans T

Figura 106 Comparativa de baterías de mayor capacidad de otra marca de baterías (Pagina vendedor Ovonics)

Cogiendo la batería de mayor capacidad la de 8000 mAh repetimos los calculo para el caso de funcionamiento en idle, consumo medio y consumo pico

$$\frac{59,2 \text{ Wh}}{1,2387 \text{ Wh}} = 47.9 \approx 47 \text{ horas}$$

$$\frac{59,2 \text{ Wh}}{30.3432 \text{ Wh}} = 1,95 \approx 1 \text{ hora y } 50 \text{ minutos}$$

$$\frac{11,1 \text{ Wh}}{74.3432 \text{ Wh}} = 0,7963 \approx 45 \text{ minutos}$$

Para un caso de uso real en una jornada laboral podría ser necesario encontrar otro tipos de batería de alta densidad y capacidad para conseguir ofrecer entre 4 y 8 horas de autonomía, lo que supondría baterías que ofreciesen entre 250 Wh y 500 Wh, de esta forma podría ser posible ofrecer un ciclo de casi 8 horas o 2 baterías de menor tamaño y capacidad si se implementa un cambio rápido y sencillo de la fuente de alimentación.

Por último hay que mencionar que es importante añadir un sistema de supervisión de la carga de las baterías, por eso sería muy recomendable por no decir casi

obligatorio un chincharro como se muestra en la Figura 107 monitor de batería con alarma Arceli 1-8s LiPo Monitor (Pagina vendedor Arceli).

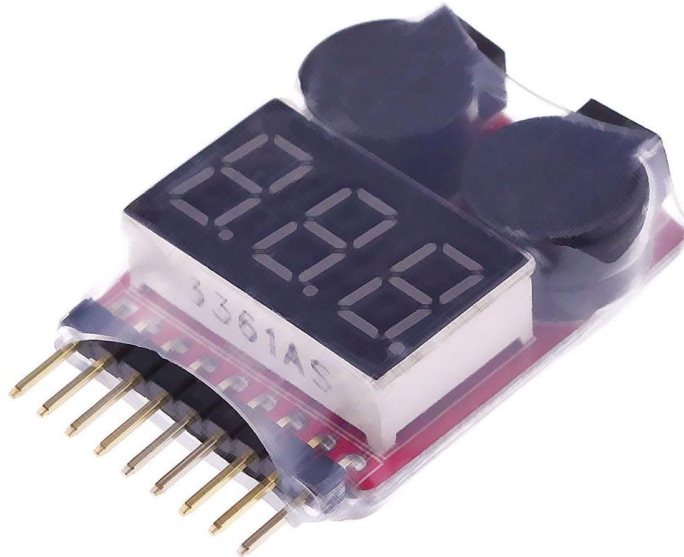


Figura 107 monitor de batería con alarma Arceli 1-8s LiPo Monitor (Pagina vendedor Arceli)

Con este dispositivo no solo permite tener control de la carga de la batería y su balance entre celdas, sino que también avisara cuando la tensión este lo suficientemente baja como para avisar de que es necesario recargar o cambiar la batería.

Capítulo 5 DESARROLLO DEL SOFTWARE

5.1 Programación

La programación se realizará mediante el lenguaje de programación C y contará con funciones para:

- Lectura de la carga/peso en la célula
- Lectura de la intención de movimiento (electromiografía, posición)
- Salida de movimiento del servomotor
- Control de la salida del servomotor

La mayoría de las lecturas se recopilan como señales analógicas (salvo la implementación de algún final de carrera si se considerase necesario)

Muchas de estas señales tienen un rango de fallo y es probable la necesidad de obtener un valor de offset para la lectura real.

Es también importante determinar una zona muerta de lectura, con el fin de evitar oscilaciones un mínimo de histéresis puede ser necesario para evitar problemas de control

Las señales de salidas se limitan a la señal de PWM dedicada al servo para proporcionar un duty cycle entre el 0% y el 100%, permitiendo variar entre las posiciones mínima y máxima del servo (0°-60°)

El funcionamiento simplificado del sistema estará dado por el siguiente diagrama de la Figura 108.

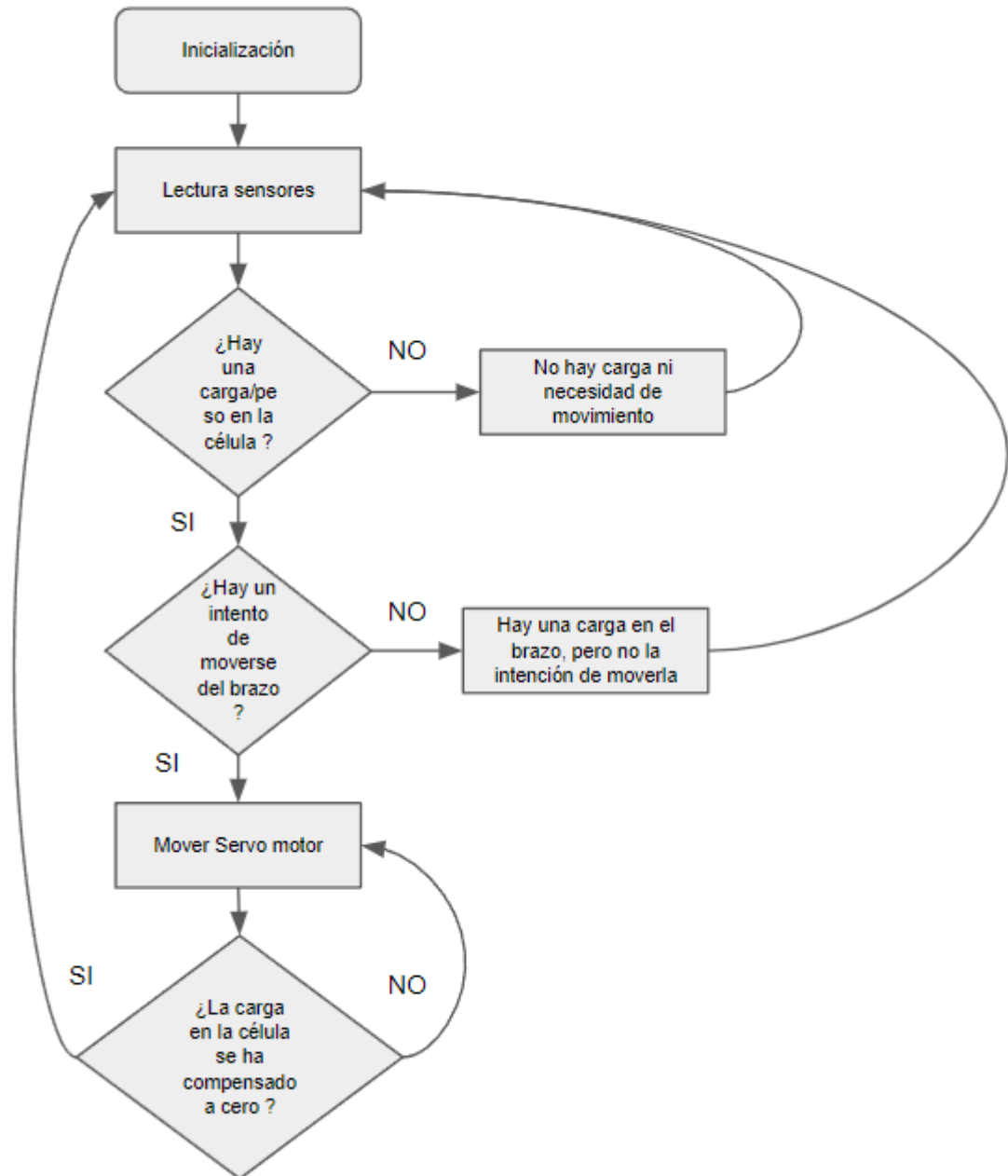


Figura 108 Diagrama lógica de programa 1

Este bucle se repetirá de forma continua mientras el sistema esté en funcionamiento. Es necesario tener en cuenta que debido al funcionamiento con la posición del servo como variable a comprobar, el sistema de control se basa en la posición y no en el par necesario para alcanzar el objetivo de levantar una carga.

Un control por par más elaborado es posible de realizar, pero al no tener un sensor del par producido por el servomotor, sería necesario implementar un medidor de corriente y asociar el consumo a un par correspondiente para la curva de consumos/par del motor.

El diagrama de dicho sistema sería algo parecido a la Figura 109

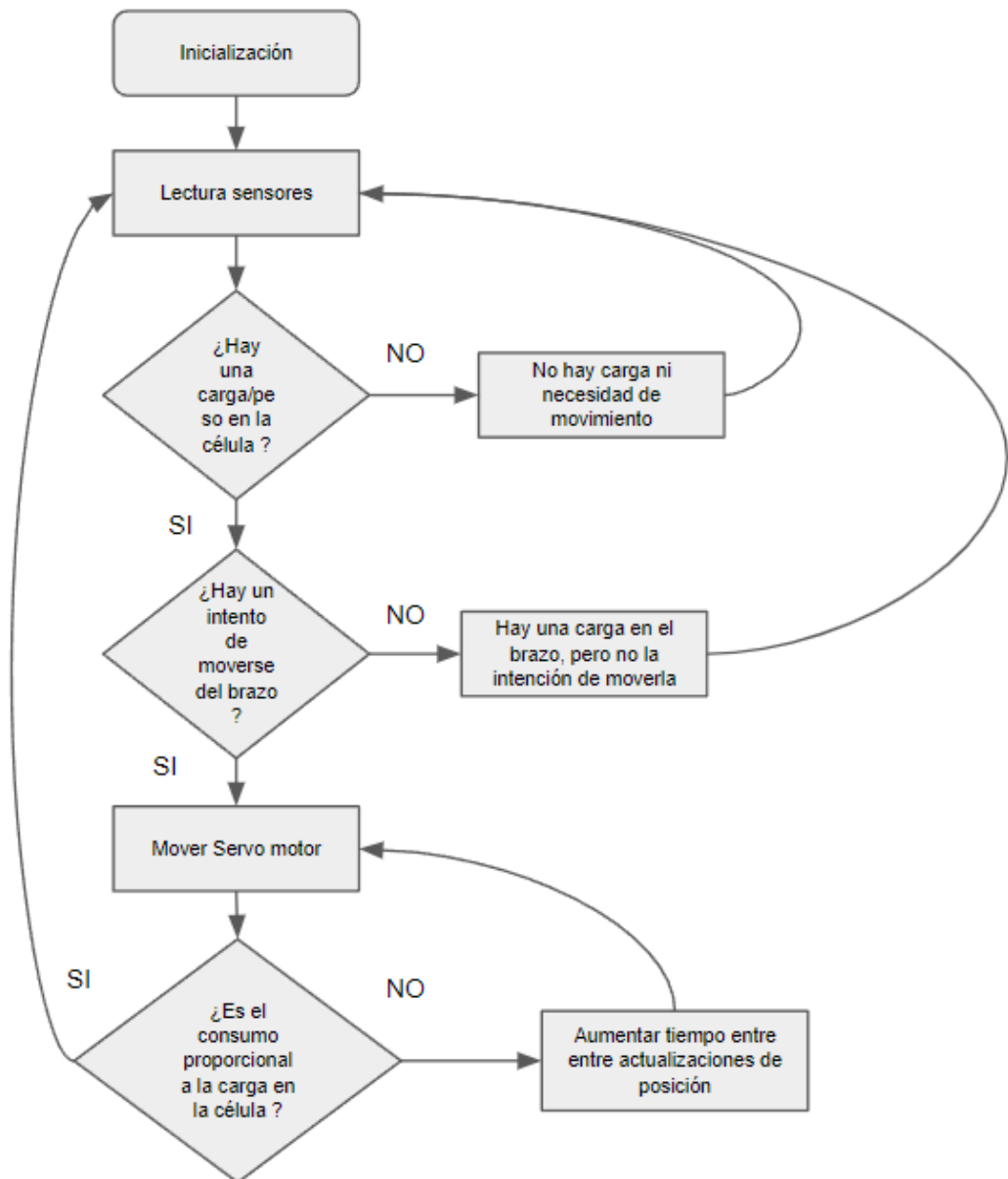


Figura 109 Diagrama lógico de programa 2 uso de par en el control

La intención de esto es que con movimientos de punto a punto cortos, se aprovecha mejor los picos de potencia y se evita una acumulación de error que pueda provocar un efecto rebote en la posición al liberarse de la carga que evitaba su avance como se aprecia en la Figura 110.

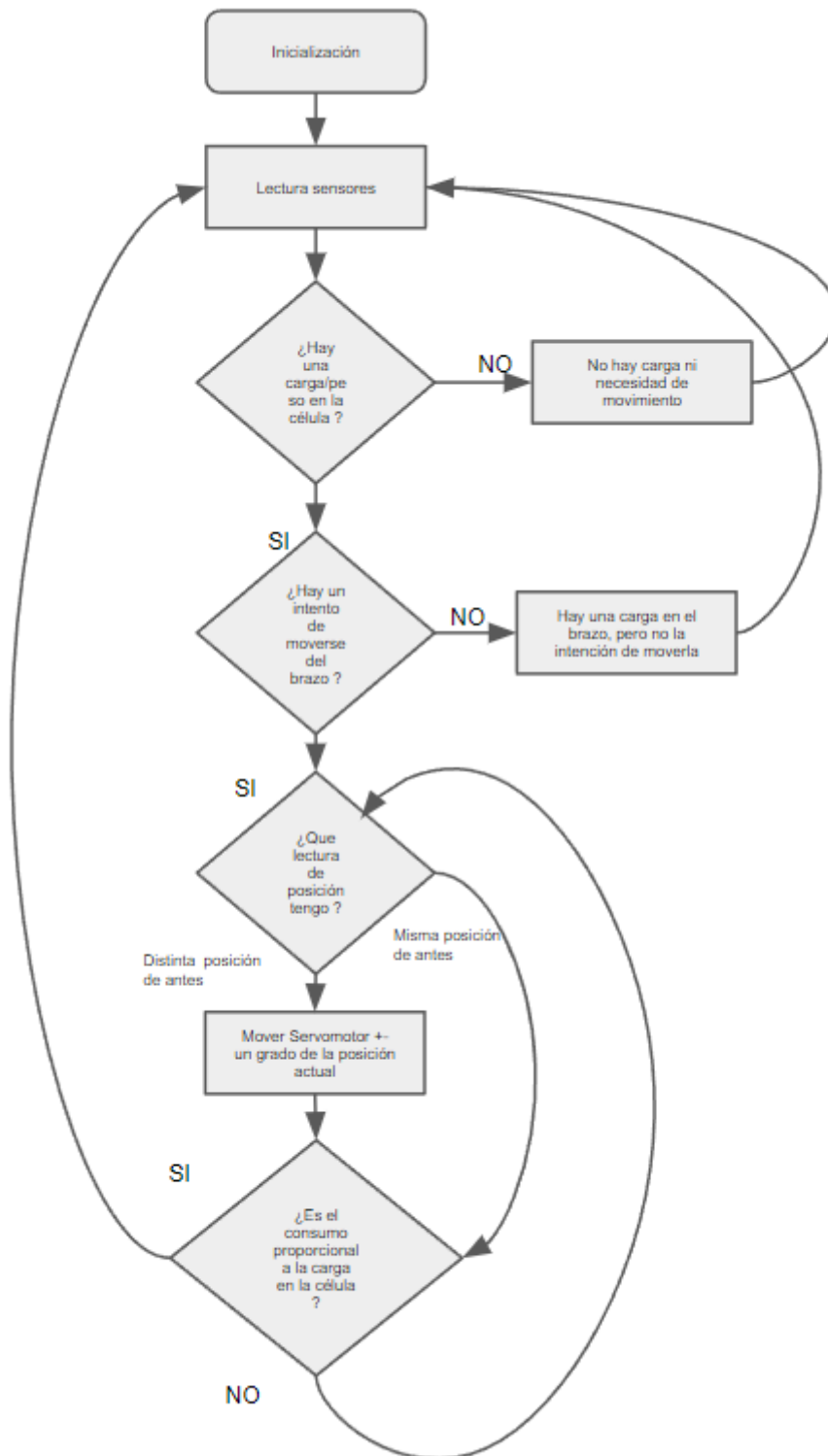


Figura 110 Diagrama lógica de programa 3 Sistema anti-saturación del error de posición

Un sistema con control de posición adicional permite entrar en un bucle para las situaciones en las cuales se maneja una carga constante de peso sin que tengamos movimiento o cambio de posición en esa zona.

De esta forma es posible mantener la ayuda a levantar la carga o implementar controles de bloqueo en posición si fuese necesario (una variedad de frenos o SEA para un sistema de movimiento pasivo).

5.2 Ajustes de control

El ajuste de control consiste en un bucle cuyo valor inicial debemos dar, pero que una vez en funcionamiento, regula el control entre la posición actual y un posición virtual a la que deseamos desplazarnos. Como se puede ver en la **FX** el bucle toma la lectura del electromiografía como posición deseada, toma la posición actual y la carga como valores, para saber a continuación cómo y hacia donde hay que desplazarse

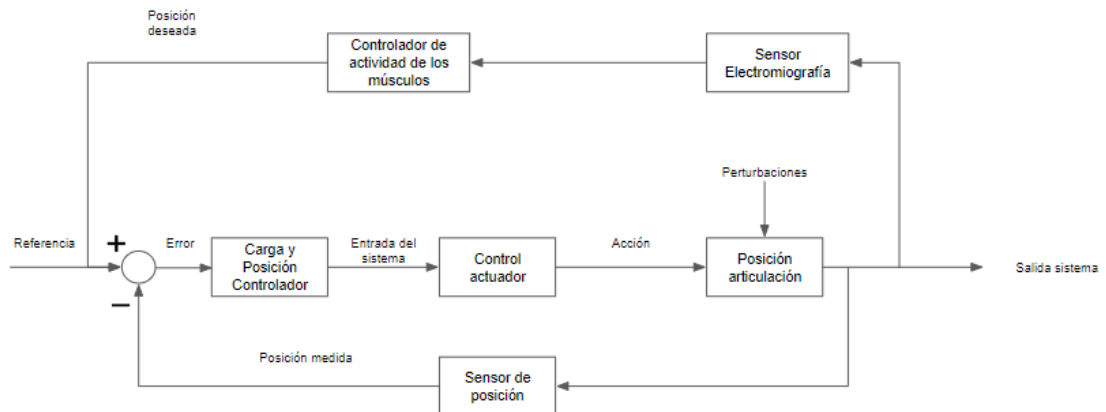


Figura diagrama sistema control

El control permite la introducción de un PID para el control del sistema y la adición de un sistema elástico añadiría una ganancia fija que aunque dificultaría el control del sistema permitiría cierto grado de flexibilidad así como también la posibilidad de tener un exoesqueleto pasivo con ajuste de posición activo.

5.3 Funcionamiento y montaje

El diagrama de la conexiones eléctricas quedaría de la manera que se ve en la Figura 111.

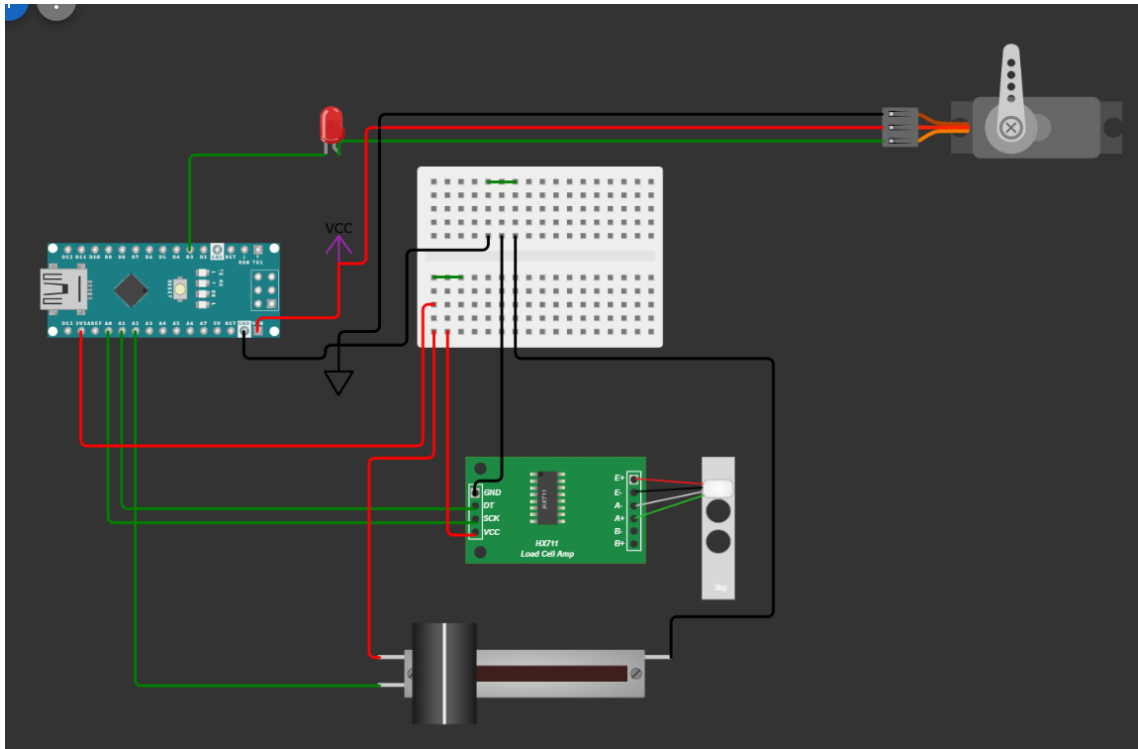


Figura 111 Diagrama eléctrico interactivo creado en Wowki

Habría una diferenciación de voltajes, casi todo sistema que tenga que traer una señal digital de vuelta funcionara en 3,3V para el mapeo en el pin analógico correspondiente.

La alimentación se ha puesto un símbolo de alimentación y tierra (aunque es necesario conectar fuentes reales para la simulación)

La célula de carga del simulador es similar en funcionamiento al componente elegido puesto que viene con un amplificador añadido al componente.

Se ha instalado un potenciómetro en la parte inferior dl diagrama como sustituto equivalente para la lectura del sensor de electromiografía

El servo tiene un funcionamiento similar aunque requieres ser mapeado para los ángulos específicos que tiene nuestro servomotor.

Con la aplicación web de Wowki es posible realizar pruebas de programación para simular sketches de como funcionaria.

Es necesario hacer pequeños ajustes para que el código se comporte de forma similar, pero es suficiente para simular el movimiento del sistema cuando detecta carga y la intención de movimiento del brazo por la electromiografía, para ello hay que marcar un valor como neutro con algo de tolerancia y hacer que el servo realice acciones según la lógica de programación anteriormente mencionada

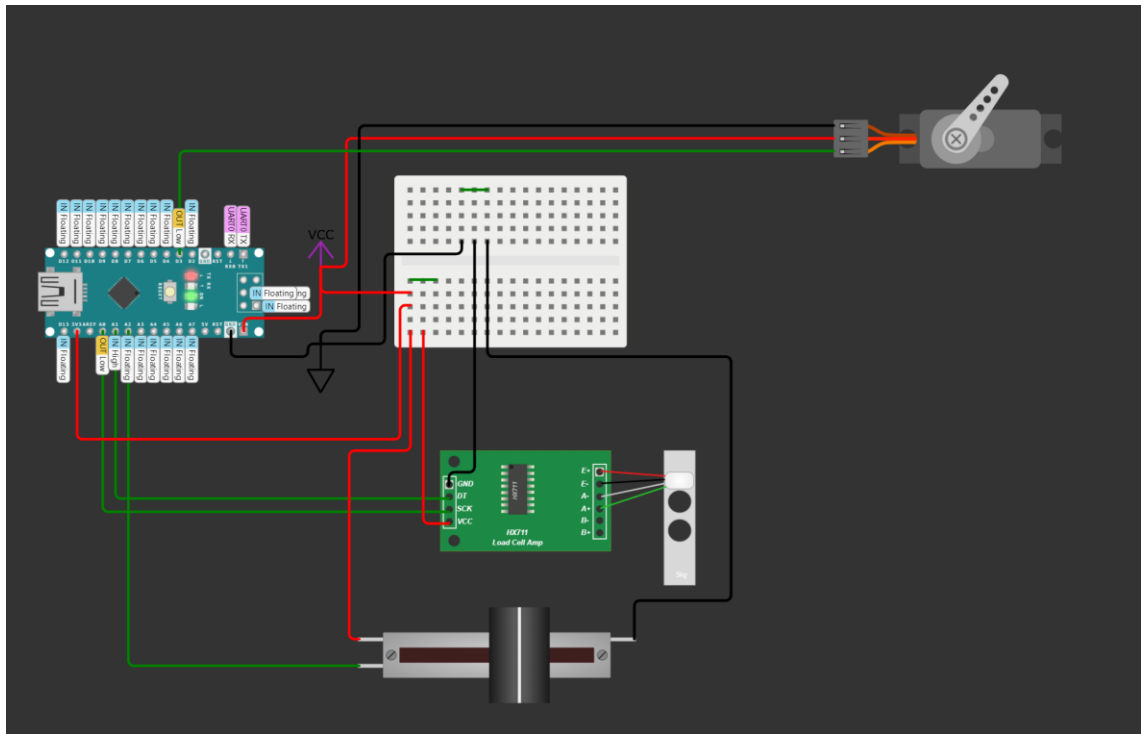


Figura 112 Control de mapeado para el servo del rango 0-60° para el potenciómetro (EMG) de valores 0-1023

Capítulo 6 Caso Práctico

En este capítulo haremos un planteamiento de la aplicación deseada de la articulación de exoesqueleto con SEA.

Un trabajador en una industria como podría ser la hostelerera se le plantea el uso del sistema.

Al ponérselo se le otorgan una capacidad de levantar con el brazo 5Kg de peso adicional (aproximadamente). El esfuerzo del transporte de objetos pesado como un cubo de agua para la limpieza es reducido casi a la mitad.

El añadir un sistema de Sea permite además almacenar carga adicional en el muelle pudiendo añadir otro Kg de fuerza para levantar.

Además la estructura del exoesqueleto conecta las dos partes que conforman la unión del brazo, por lo que cualquier tensión que pudiese sentir la articulación al cargar este peso, pasa directamente al exoesqueleto sin afectar al brazo del trabajador como se muestra en la Figura 113.



Figura 113 Distribución de carga en Exoesqueleto de como el exoesqueleto protege la articulación

En el caso de que requiera hacer operaciones como limpieza a mano de superficie, un trabajo repetitivo en el que se pueden desarrollar enfermedades como codo de tenista o túnel carpiano. Puede reducirse el esfuerzo de forma activa usando el motor del sistema o bloqueando la posición del exoesqueleto y dejando que el

resorte del SEA ejerza la fuerza de presión necesario y transmitiendo esa carga que iría a la articulación del codo a los hombros como una carga constante.

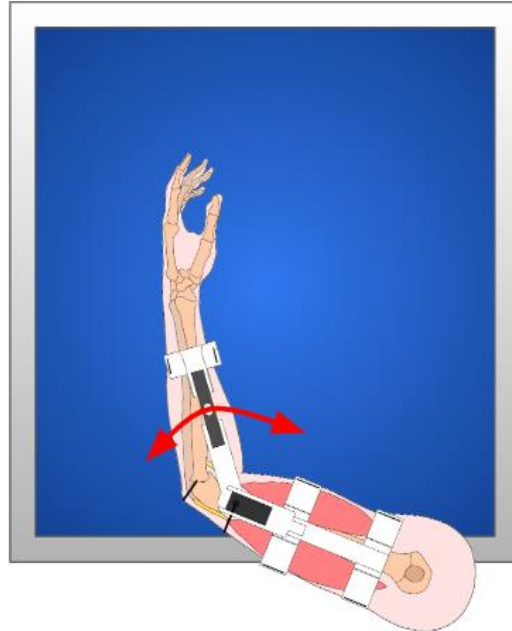


Figura 114 Soporte del exoesqueleto para movimientos repetitivos mediante un mecanismo elástico

Estos son algunas de las situaciones en las que nuestro sistema podría ayudar, pero no están limitados a ellos ya que supone una ayuda adicional de fuerza y reducción del esfuerzo que de escalarse a otras articulación podría proteger y dar soporte para una variedad más grande de tareas de todo tipo.

Podría servir hasta para la escalada o asistir en subir escaleras de mano, aunque habría que obtener un buen ratio de fuerza de soporte con peso adicional que hay que soportar al equiparse con un exoesqueleto.

O permitir el uso de cierta herramientas que producen efectos adversos por las vibraciones que producen que la base de datos del Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo recoge. Algunas de estas como taladros, martillos hidráulicos y similares, requieren de periodos de reposos si se excede un numero de minutos de trabajo continuo.

Capítulo 7 MEJORAS Y POSIBLES DESARROLLOS

En este capítulo se nombrarán algunas de las mejoras y posibles desarrollos que no se han implementado en el proyecto por cuestiones de tiempo o alcance del mismo, pero que consideramos lo suficientemente importantes como para mencionarlas y justificar su posible desarrollo e implementación.

7.1 Circuito de seguridad

Cuando algunos sistema por la gravedad o la frecuencia de situaciones peligrosas, como norma general se les exige un nivel mínimo de seguridad y redundancia.

Con esta razón existen sistemas como el de Nivel de Seguridad Integrada (SIL) que con el objetivo de evitar situaciones peligrosas o mortales imponen unos estándares y niveles de seguridad como se muestra en la Figura 115.

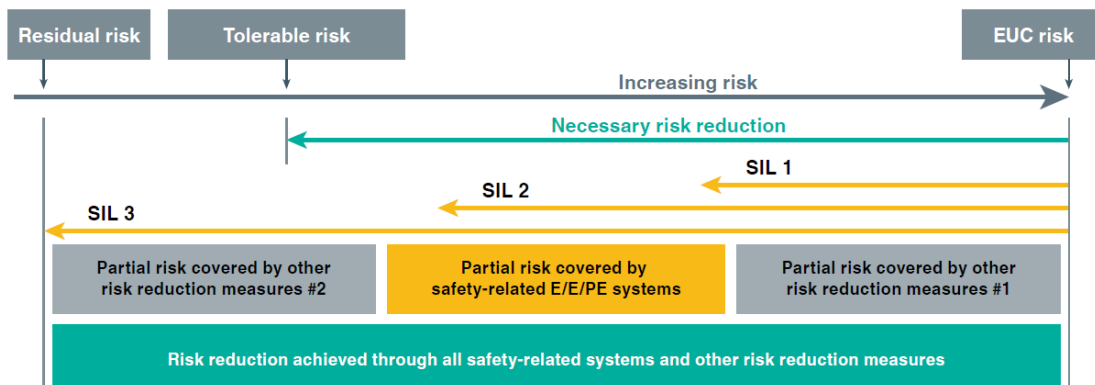


Figura 115 Whitepaper Peperl & Fuchs sobre niveles de seguridad y riesgo [32]

Por esta razón implementar un circuito de seguridad que detecte el fallo de componentes, algún interruptor de seguridad o duplicidades en sistemas críticos, aunque sería un incremento del coste y peso del sistema, podría evitar accidentes indeseados por fallos de componentes o de tipo humano.

7.2 Freno para la reducción de consumos

El uso de unos frenos en el sistema del motor permitiría en conjunto con una frenada regenerativa el poder mantener una posición determinada y oponiéndose a un par resultante de la carga que levanta el exoesqueleto en este sistema.

Aunque supone un adición con su correspondiente, peso, consumo y coste monetario, es uno de los primeros requerimientos para un sistema de seguridad con redundancia.

Los motores generalmente implementados en motores de este tipo suelen configurarse para activarse cuando se requiere realizar un movimiento y

desactivarse cuando no se necesita mover el motor o se desea mantener una posición en oposición a otra fuerza. Como se ve en la figura FX los frenos suelen usar un sistema de imanes permanentes con muelles para retornar el freno a su posición inicial en la cual un disco de freno entra en contacto con el eje del motor frenando el sistema como se puede apreciar en la Figura 116 [33].

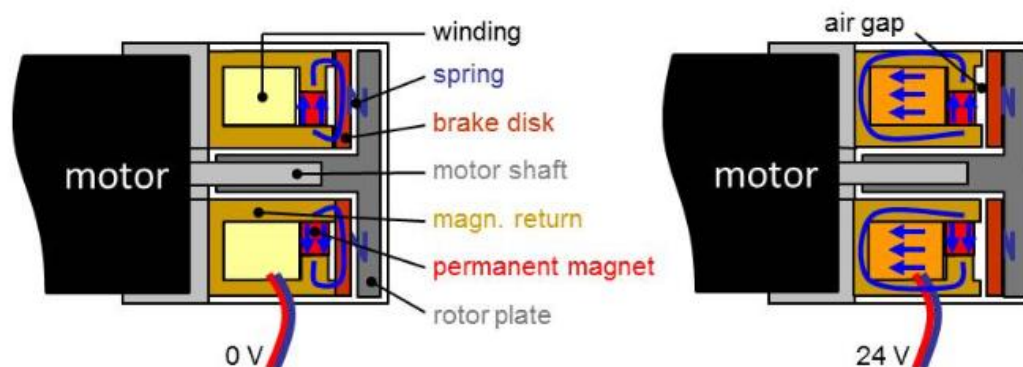


Figura 116 freno implementado en motor Maxon group [33]

Con esta implementación situaciones como una pérdida de alimentación, un fallo mecánico o incluso un movimiento repentino e inesperado, generara una frenada del sistema evitando posibles lesiones y averías.

7.3 Mejores baterías

Esta es una de las mejoras más abstractas, ya que con el impulso de los vehículos eléctricos con baterías, cada año se desarrolla nuevas y mejores baterías para todo tipo de sistemas electrónicos.

Nuevas químicas, baterías más ligeras, baterías más baratas o simplemente mayores densidades energéticas.

Uno de tecnologías más importantes desarrollándose hasta la fecha son las baterías de Litio con electrolito sólido, que aunque al principio tendrán un coste muy superior a las baterías actuales, supone una mejora de la densidad energética y seguridad de las baterías.

Estas nuevas baterías aguantan mejor los cambios de temperatura, las resistencia ante el contacto de una llama, cortes, perforaciones, etc.

Por esta razón se considera que es un aspecto que podría mejorar mucho todo tipo de sistemas de movilidad con base eléctrica (no solamente los exoesqueletos).

7.4 Mejores componentes

El mundo de la microelectrónica tiene un ciclo de mejora constante que permite no solo realizar mejores productos, si no también reducir el coste de producción, permitiendo que esté al alcance de muchas personas esto componentes y los productos derivados de ellos.

La mejora del rendimiento de los procesadores, la miniaturización de módulos de comunicación puede llegar a permitir implementar sistemas cada vez más comunicados entre sí y con menos necesidad de cableados complejos y pesados.

7.5 Mejores algoritmos

De la misma forma que la programación suele avanzar de la mano de sistemas más potentes, uno de los posibles desarrollos a tener en cuenta sería el uso de las redes neuronales para el reconocimiento de patrones de movimiento.

La posible orientación sería una de tipo personalizado que permitiese reconocer patrones de movimiento no discernibles al ojo humano e intentar adelantarse a los deseos de desplazarse del usuario.

Aunque suena a algo abstracto y nebulosos, este tipo de tecnologías ya se implementan en muchos aspecto de la robótica pudiendo reconocer patrones y predecir eventos gracias a ellos.

7.6 Mejor Interfaz

Una interfaz minimalista para saber el estado de batería, errores de componentes o si ciertas partes están actuando de forma correcta (para diagnósticos de problemas) sería de gran utilidad. Una de las posibilidades sería implementar un smartphone como pantalla interfaz para hacer el seguimiento de algunos de estos parámetros mediante comunicación Wifi o bluetooth.

Capítulo 8 CONCLUSIONES

Los exoesqueletos como sistema de apoyo o protección son un área de gran interés que tiene mucho futuro por delante.

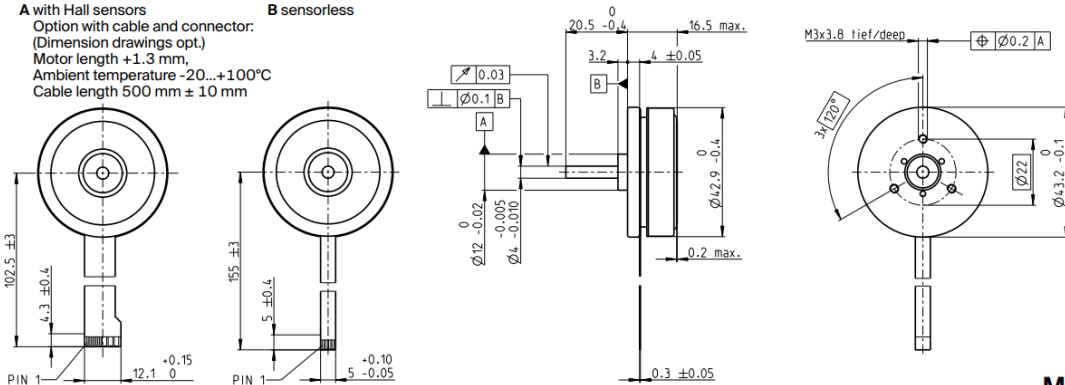
El desarrollo de nuevos materiales, nuevos tipos de fabricación, el desarrollo de nuevos componentes de microelectrónica, motores eléctricos más eficientes/compactos y baterías con mayor densidad gravimétrica harán que no solo sea asequible el implementar estos sistemas en una amplia variedad de áreas laborales, sino que también merezca la pena promover su uso a un nivel burocrático.

Con el objetivo de evitar pérdidas de producción, lesiones, bajas laborales o posibles incapacidades derivadas de enfermedades de origen laboral, se puede considerar razonable que muchas empresas y gobiernos promuevan o incluso obliguen su uso, con el fin de evitar estos posibles efectos negativos a largo plazo, de la misma manera que cascos, arneses, calzado de seguridad y otros equipos de protección personal son requeridos en ciertos sectores por las empresas e instituciones gubernamentales correspondientes.

En particular el área de la robótica blanda junto con exoesqueletos pasivos puede ofrecer una solución eficaz a las necesidades de una amplia variedad de trabajadores, otorgando muchas horas de trabajo realizado mientras que se minimiza la carga y fatiga que puede sufrir el empleado.

Capítulo 9 ANEXOS

EC 45 flat $\varnothing 42.9$ mm, brushless, 30 watt

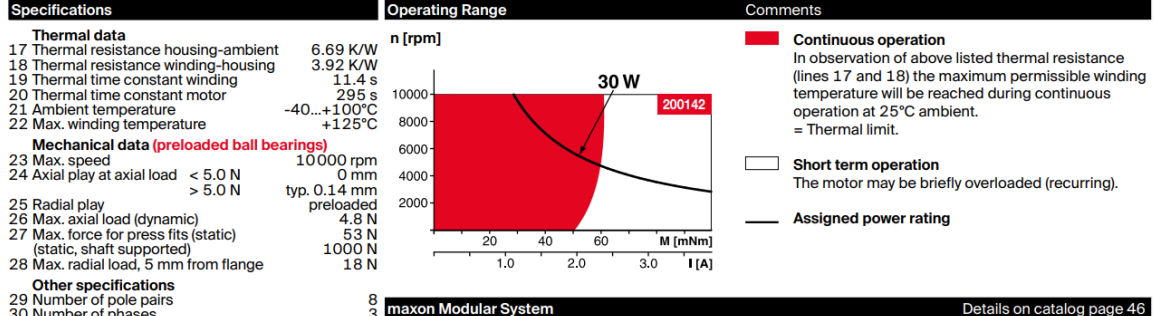


M 1:2

EC flat

	Part Numbers					
A with Hall sensors	200142	339281	339282			
Option with Cable and Connector	668555	668556	668557			
B sensorless	200189	339283	339284			

Motor Data							
Values at nominal voltage							
1 Nominal voltage	V	12	12	24	24	36	36
2 No load speed	rpm	4370	4350	4360	4380	4750	4760
3 No load current	mA	163	163	81.4	73	61.6	55.3
4 Nominal speed	rpm	2940	2800	2940	2900	3290	3270
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	55	54.7	54.8	55.2	66	66.6
6 Nominal current (max. continuous current)	A	2.02	2.02	1.01	1.01	0.847	0.849
7 Stall torque*	mNm	255	219	253	243	380	369
8 Stall current	A	10	8.58	4.97	4.77	5.38	5.22
9 Max. efficiency	%	76	75	76	77	80	81
Characteristics							
10 Terminal resistance phase to phase	Ω	1.2	1.4	4.83	5.03	6.69	6.89
11 Terminal inductance phase to phase	mH	0.56	0.56	2.24	2.24	4.29	4.29
12 Torque constant	mNm/A	25.5	25.5	51	51	70.6	70.6
13 Speed constant	rpm/V	374	374	187	187	135	135
14 Speed/torque gradient	rpm/mNm	17.6	20.5	17.7	18.5	12.8	13.2
15 Mechanical time constant	ms	171	19.9	17.2	17.9	12.4	12.8
16 Rotor inertia	gcm ²	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5



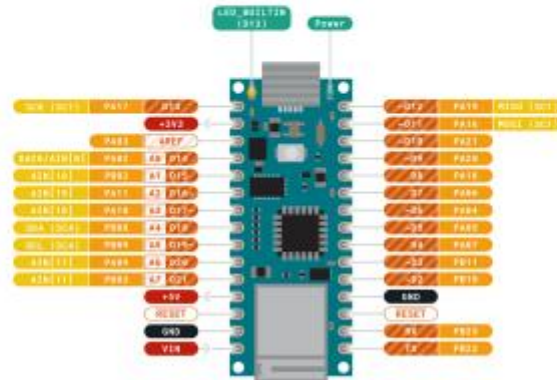
maxon Modular System		Details on catalog page 46	
Planetary Gearhead $\varnothing 32$ mm 0.75 - 6.0 Nm Page 394/398 Planetary Gearhead $\varnothing 42$ mm 3.0 - 15.0 Nm Page 407 Spur Gearhead $\varnothing 45$ mm 0.5 - 2.0 Nm Page 409		Recommended Electronics: Notes Page 46 ESCON Module 24/2 500 ESCON 36/3 EC 501 ESCON Mod. 50/4 EC-S 501 ESCON Module 50/5 501 ESCON 50/5 503 DEC Module 24/2 505 DEC Module 50/5 505 EPOS4 Micro 24/5 509 EPOS4 Mod./Comp. 24/1.5 510 EPOS4 Mod./Comp. 50/5 510 EPOS4 Comp. 24/5 3-axes 511 EPOS4 50/5 515 EPOS4 Disk 60/8 516 EPOS2 P 24/5 520	for motor type A: Encoder MILE 256 - 2048 CPT, 2 channels Page 460



Arduino® Nano 33 IoT



ARDUINO
 NANO 33 IoT



Pinout

5.1 USB

Pin	Function	Type	Description
1	VUSB	Power	Power Supply Input. If board is powered via VUSB from header this is an Output (1)
2	D-	Differential	USB differential data -
3	D+	Differential	USB differential data +
4	ID	Analog	Selects Host/Device functionality
5	GND	Power	Power Ground

1. The board can support USB host mode only if powered via the VUSB pin and if the jumper close to the VUSB pin is shorted.



5.2 Headers

The board exposes two 15 pin connectors which can either be assembled with pin headers or soldered through castellated vias.

Pin	Function	Type	Description
1	D13	Digital	GPIO
2	+3V3	Power Out	Internally generated power output to external devices
3	AREF	Analog	Analog Reference; can be used as GPIO
4	A0/DAC0	Analog	ADC in/DAC out; can be used as GPIO
5	A1	Analog	ADC in; can be used as GPIO
6	A2	Analog	ADC in; can be used as GPIO
7	A3	Analog	ADC in; can be used as GPIO
8	A4/SDA	Analog	ADC in; I2C SDA; Can be used as GPIO (1)
9	A5/SCL	Analog	ADC in; I2C SCL; Can be used as GPIO (1)
10	A6	Analog	ADC in; can be used as GPIO
11	A7	Analog	ADC in; can be used as GPIO
12	VUSB	Power In/Out	Normally NC; can be connected to VUSB pin of the USB connector by shorting a jumper
13	RST	Digital In	Active low reset input (duplicate of pin 18)
14	GND	Power	Power Ground
15	VIN	Power In	Vin Power input
16	TX	Digital	USART TX; can be used as GPIO
17	RX	Digital	USART RX; can be used as GPIO
18	RST	Digital	Active low reset input (duplicate of pin 13)
19	GND	Power	Power Ground
20	D2	Digital	GPIO
21	D3/PWM	Digital	GPIO; can be used as PWM
22	D4	Digital	GPIO
23	D5/PWM	Digital	GPIO; can be used as PWM
24	D6/PWM	Digital	GPIO; can be used as PWM
25	D7	Digital	GPIO
26	D8	Digital	GPIO
27	D9/PWM	Digital	GPIO; can be used as PWM
28	D10/PWM	Digital	GPIO; can be used as PWM
29	D11/MOSI	Digital	SPI MOSI; can be used as GPIO
30	D12/MISO	Digital	SPI MISO; can be used as GPIO

5.3 Debug

On the bottom side of the board, under the communication module, debug signals are arranged as 3x2 test pads with 100 mil pitch. Pin 1 is depicted in Figure 3 – Connector Positions

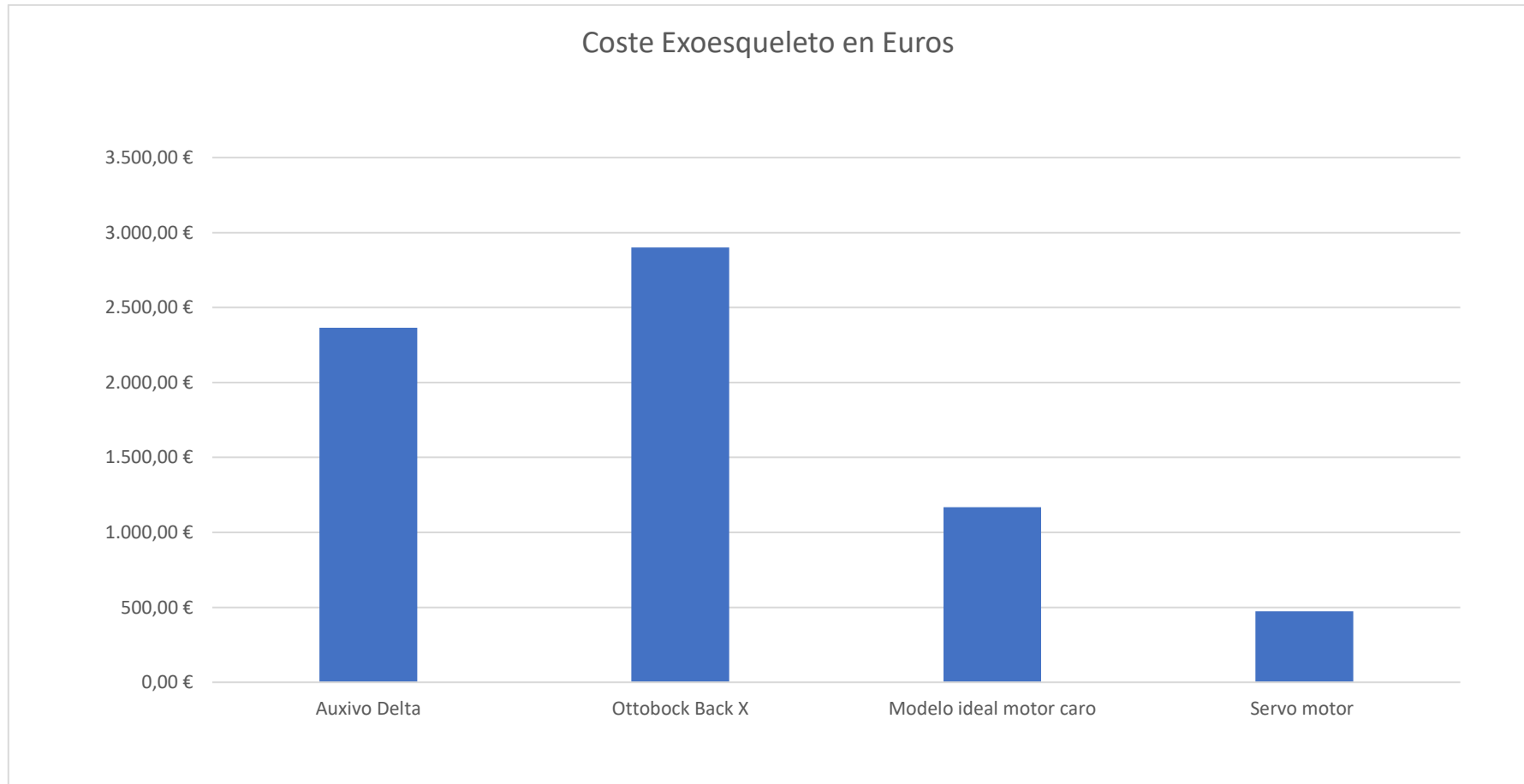
Pin	Function	Type	Description
1	+3V3	Power Out	Internally generated power output to be used as voltage reference
2	SWD	Digital	SAMD11 Single Wire Debug Data
3	SWCLK	Digital In	SAMD11 Single Wire Debug Clock
4	UPDI	Digital	ATMega4809 update interface
5	GND	Power	Power Ground
6	RST	Digital In	Active low reset input

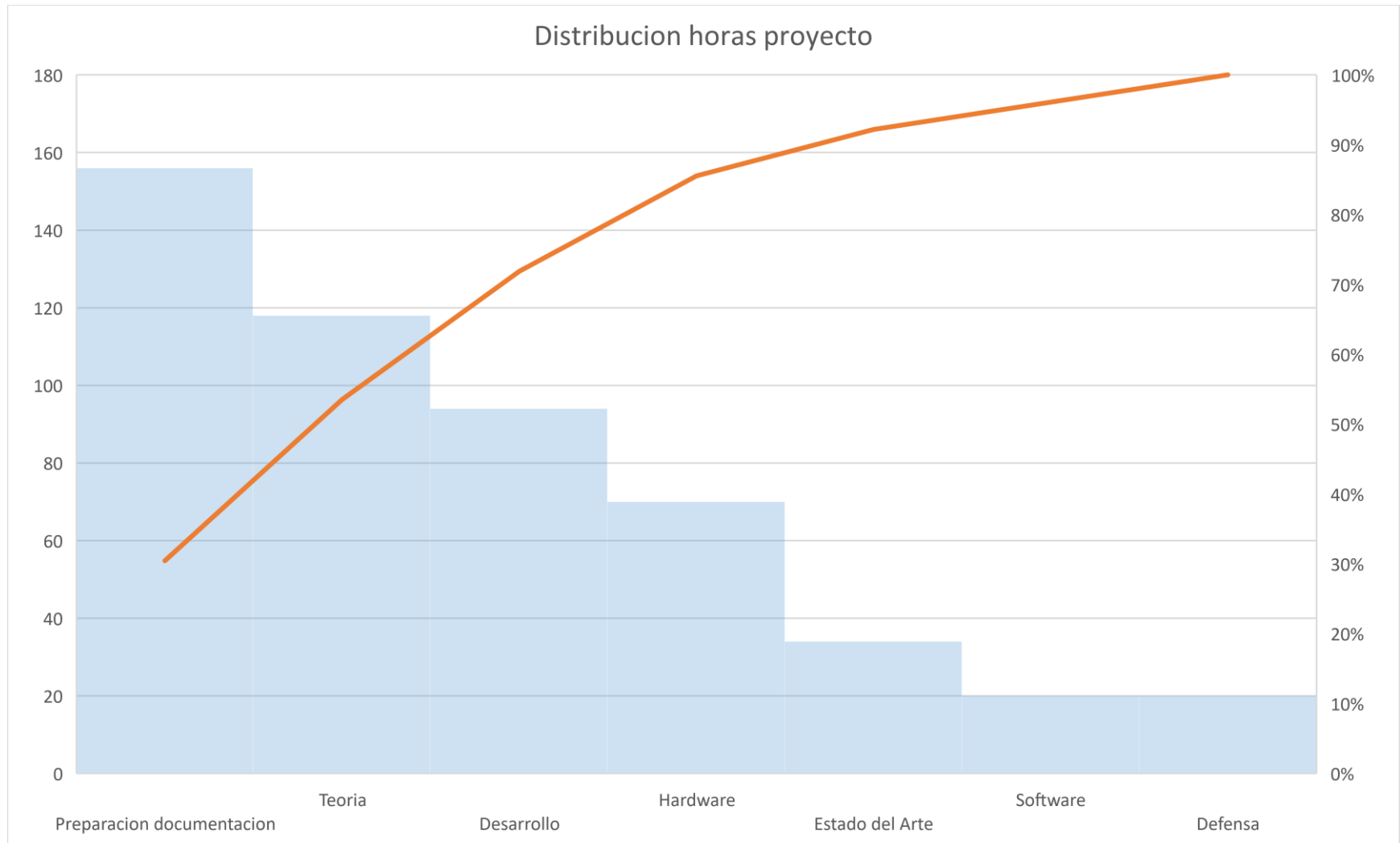
Capítulo 10 PRESUPUESTO

Nombre	Coste unitario	Peso (gramos)	Voltaje	Consumo idle (mAh)	Consumo pico (mAh) ²	Unidades	Coste Total	Peso total (g)	Consumo total idle (Wh)	Consumo total pico (Wh) ²
Servomotor CYS-S0650	52,00 €	280	7,4	150	10000	1	52,00 €	280	1,11	74
Arduino Nano	22,80 €	5	3,3	25	85	1	22,80 €	5	0,0825	0,2805
Célula de carga tal220 10k HT sensor	9,50 €	25	0	0	0	1	9,50 €	25	0	0
Amplificador INA125PA	5,82 €	1	3,3	5	5	1	5,82 €	1	0,0165	0,0165
MyoWare 1.0 muscle sensor	32,00 €	8	3,3	9	14	1	32,00 €	8	0,0297	0,0462
Estructura aluminio	220,00 €	1245				1	220,00 €	1245	0	0
Estructura PLA	8,00 €	358				1	8,00 €	358	0	0
Tornillería	5,00 €	230				1	5,00 €	230	0	0
Batería LiPo	15,20 €	88				1	15,20 €	88	0	0
Cables y otros materiales electrónicos	42,50 €	201				1	42,50 €	201	0	0
Muelle de Torsión	60,00 €	228				1	60,00 €	228	0	0
Hora de ingeniería	80,00 €					512	40.960,00 €	0	0	0
							0,00 €	0	0	0
Sumatorio		2669		189	10104		41.432,82 €	2669	1,2387	74,3432

1º prototipo: 41.432,82 €

1º producto: 472,82 €€





Capítulo 11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] «Industrial Exoskeletons: What You're Not Hearing -- Occupational Health & Safety». <https://ohsonline.com/Articles/2018/10/01/Industrial-Exoskeletons-What-Youre-Not-Hearing.aspx?Page=2> (accedido 8 de abril de 2023).
- [2] N. Yagin, «Yagin, Nicholas. "Apparatus for Facilitating Walking". U.S. Patent 440,684 filed February 11, 1890 and issued November 18, 1890 - Google Patents». <https://patents.google.com/patent/US440684> (accedido 5 de mayo de 2023).
- [3] «Exoskeleton | CarrySuit | Auxivo». <https://www.auxivo.com/carrysuit> (accedido 8 de abril de 2023).
- [4] «Exoskeleton | LiftSuit | Auxivo». <https://www.auxivo.com/liftsuit> (accedido 8 de abril de 2023).
- [5] «Ottobock Shoulder - Schulter-Exoskelett für die Überkopfarbeit». <https://ottobockexoskeletons.com/obs/?lang=en&lang=en> (accedido 9 de abril de 2023).
- [6] «Back exoskeletons from Ottobock - innovation for logistics!» <https://ottobockexoskeletons.com/back-portfolio/?lang=en> (accedido 9 de abril de 2023).
- [7] L. C. Kelley, «US1308675A - Pedomotor. - Google Patents», julio de 1919. <https://patents.google.com/patent/US1308675> (accedido 5 de mayo de 2023).
- [8] S. Karlin, «Raytheon Sarcos's Exoskeleton Nears Production - IEEE Spectrum». <https://spectrum.ieee.org/raytheon-sarcoss-exoskeleton-nears-production> (accedido 5 de mayo de 2023).
- [9] «Sarcos Demonstrates Powered Exosuit That Gives Workers Super Strength - IEEE Spectrum». <https://spectrum.ieee.org/sarcos-guardian-xo-powered-exoskeleton> (accedido 5 de mayo de 2023).
- [10] «Guardian® XO® Full-body Powered Exoskeleton | Sarcos Robotics». <https://www.sarcos.com/products/guardian-xo-powered-exoskeleton/> (accedido 5 de mayo de 2023).
- [11] Auxivo AG, «EduExo1.0 handbook». 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.auxivo.com/eduexo>
- [12] P. A. Brennan, S. Standring, S. Wiseman, y H. Gray, Eds., *Gray's surgical anatomy*, First edition. Amsterdam: Elsevier Health Services, 2020.
- [13] «Introducción a los aspectos ergonómicos y a otros factores de riesgos derivados del uso de robots, exoesqueletos y drones».
- [14] «A guide to manage and assess ergonomic and psychosocial risks in the hotel industry».
- [15] R. G. Budynas, «Diseño en ingeniería mecánica de Shigley».
- [16] «Archivo:HarmonicDriveAni.gif - Wikipedia, la enciclopedia libre». <https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:HarmonicDriveAni.gif> (accedido 15 de mayo de 2023).
- [17] G. Mosca, *FÍSICA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA 6ED VOLUMEN 1. Mecánica/Oscilaciones y Ondas/Termodinámica*. Reverté, 2010.
- [18] «Mass-spring-damper model - Wikipedia». https://en.wikipedia.org/wiki/Mass-spring-damper_model (accedido 22 de mayo de 2023).

- [19] «Double wishbone suspension - Wikipedia». https://en.wikipedia.org/wiki/Double_wishbone_suspension (accedido 22 de mayo de 2023).
- [20] «Spring (device) - Wikipedia». [https://en.wikipedia.org/wiki/Spring_\(device\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Spring_(device)) (accedido 22 de mayo de 2023).
- [21] «How Gas Springs Work - Industrial Gas Springs, Inc.» <https://industrialgassprings.com/how-gas-springs-work/> (accedido 22 de mayo de 2023).
- [22] C. Lee y S. Oh, «Development, Analysis, and Control of Series Elastic Actuator-Driven Robot Leg», *Front. Neurobot.*, vol. 13, p. 17, may 2019, doi: 10.3389/fnbot.2019.00017.
- [23] «Series Elastic Actuator: Design, Analysis and Comparison | IntechOpen». <https://www.intechopen.com/chapters/51224> (accedido 22 de mayo de 2023).
- [24] Katsuhiko Ogata, *Ingeniería de control moderna*, 5º. Madri: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010.
- [25] «Battery Consortium | MIT Industrial Battery Consortium». <https://battery.mit.edu/> (accedido 8 de julio de 2023).
- [26] «Energys White Papers». <https://www.energys.com/en/resources/documents/?page=1&productrange=&documenttype=White%20Papers&documentlanguage=> (accedido 2 de julio de 2023).
- [27] «Discover the maxon's world of drive technology | maxon group». <https://www.maxongroup.com/maxon/view/content/index> (accedido 13 de julio de 2023).
- [28] «How to Control Servo Motors with Arduino - Complete Guide». <https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-servo-motors-work-how-to-control-servos-using-arduino/> (accedido 13 de julio de 2023).
- [29] «Load Cell Amplifier HX711 Breakout Hookup Guide - SparkFun Learn». <https://learn.sparkfun.com/tutorials/load-cell-amplifier-hx711-breakout-hookup-guide> (accedido 13 de julio de 2023).
- [30] «MyoWare Muscle Sensor Kit - SparkFun Learn». <https://learn.sparkfun.com/tutorials/myoware-muscle-sensor-kit/all> (accedido 13 de julio de 2023).
- [31] «Nano 33 IoT | Arduino Documentation». <https://docs.arduino.cc/hardware/nano-33-iot> (accedido 13 de julio de 2023).
- [32] Pepperl&Fuchs, «Functional Safety Compendium».
- [33] «Brake: What to consider – maxon Support». <https://support.maxongroup.com/hc/en-us/articles/360004294873-Brake-What-to-consider> (accedido 10 de julio de 2023).