

Diseño preliminar de un dispositivo mecatrónico para el entrenamiento y evaluación de fuerza muscular

Brayan Álvarez Gubelin¹, Jorge González Salazar²

¹Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad de La Frontera, Chile. Email: b.alvarez02@ufromail.cl

²Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad de La Frontera, Chile. Email: jorge.gonzalez@ufrontera.cl

Resumen

El presente trabajo presenta el diseño preliminar de un dispositivo mecatrónico para el entrenamiento y evaluación de la fuerza muscular. La motivación surge de la necesidad de mejorar los métodos tradicionales de entrenamiento y evaluación de fuerza muscular a través de máquinas de resistencia variable controladas por computadoras. El proyecto comprende las áreas de la biomecánica, mecatrónica y desarrollo de productos, y sigue un modelo de etapas adaptado del programa de tecnología industrial de EE.UU., enfocándose en las dos primeras etapas: investigación preliminar y definición conceptual. Los resultados obtenidos establecen los requisitos iniciales para el diseño preliminar de la máquina, culminando en la conceptualización del dispositivo mecatrónico propuesto.

Palabras clave: entrenamiento de fuerza, mecatrónica, diseño preliminar, biomecánica, resistencia variable.

Abstract

This work presents the preliminary design of a mechatronic device for the training and evaluation of muscle strength. The motivation arises from the need to improve traditional methods of muscle strength training and evaluation through computer-controlled variable resistance machines. The project comprises the areas of biomechanics, mechatronics, and product development, following a stage model adapted from the U.S. industrial technology program, focusing on the first two stages: preliminary research and conceptual definition. The results obtained establish the initial requirements for the preliminary design of the machine, culminating in the conceptualization of the proposed mechatronic device.

Keywords: strength training, mechatronics, preliminary design, biomechanics, variable resistance.

1. Introducción

La fuerza muscular es la capacidad de la musculatura para deformar un cuerpo o modificar su aceleración. Una mayor fuerza muscular se asocia con un mejor rendimiento en las habilidades deportivas generales y específicas, así como con una disminución en la tasa de lesiones sobre el deportista [1,2]. El entrenamiento de fuerza permite aumentar la fuerza muscular máxima o absoluta, la fuerza explosiva y la hipertrofia muscular [3]. Además, es efectivo para mejorar la salud física y mental, contribuyendo al aumento significativo del peso magro y la tasa metabólica. Entre otros beneficios, el entrenamiento de fuerza reduce dolores lumbares, disminuye el malestar artrítico, aumenta la independencia funcional, mejora el control y la rapidez al caminar, y es recomendado para la prevención de la diabetes tipo 2, ya que mejora la homeostasis de la glucosa e insulina [4].

Existen diversos dispositivos en el mercado para el entrenamiento de fuerza muscular. Dependiendo del

origen de la resistencia, se encuentran los pesos libres o isoinerciales, cadenas, balones medicinales, máquinas dependientes de la gravedad, máquinas con sistemas hidráulicos y neumáticos, resistencia acuática, resistencia elástica y aparatos controlados electrónicamente [1]. Es en este último tipo de dispositivos en donde se enfoca el presente trabajo.

Hay una variedad de dispositivos para entrenamiento y evaluación de fuerza controlados por computadora. El dinamómetro isocinético es uno de estos dispositivos, compuesto por una combinación de sistemas mecánicos, eléctricos, electrónicos y softwares. El objetivo de este equipo es trabajar y evaluar la fuerza muscular mediante la realización de ejercicios asistidos electrónicamente a velocidades, torques y posiciones específicas, utilizando un servomotor con sistema de control de lazo cerrado para crear la resistencia [5]. La interpretación de los datos entregados por los sensores del dinamómetro puede ser utilizada para la detección precoz de signos que puedan predisponer a una lesión, realizar el seguimiento de la recuperación funcional de

un individuo lesionado y determinar el estado físico óptimo del paciente para la reanudación de las actividades cotidianas y/o atléticas [6].

Actualmente, los avances tecnológicos permiten desarrollar dispositivos controlados por computadora y accionados por cables de manera comercial, como es el caso de OxeFit XS1 [7]. Estos dispositivos representan una mejora significativa en comparación con los métodos tradicionales de entrenamiento, proporcionando una resistencia ajustable y un monitoreo en tiempo real del rendimiento del usuario.

1.1. Descripción del problema

Se busca diseñar conceptualmente un dinamómetro multimodal, que soporta varios modos de trabajo, para el entrenamiento y evaluación de fuerza muscular de usuarios tanto del área del deporte como de la rehabilitación. Se considera que a futuro sea adaptable para dar respuesta a las necesidades de la población local.

La resistencia será generada por un servomotor eléctrico y transmitida mediante un cable, similar al funcionamiento de las máquinas de polea tradicionales. Este dinamómetro permitirá tres modalidades de entrenamiento: isométrico, isotónico e isocinético [8]. La carga o resistencia mecánica del ejercicio podrá programarse para seguir diferentes modos de trabajo, incluyendo la simulación de efectos de resortes lineales o no lineales, amortiguadores viscosos y fricción seca. Además, se podrá ampliar a más modos para investigar nuevas estrategias de entrenamiento o rehabilitación.

El dinamómetro multimodal debe proporcionar datos relevantes durante el ejercicio, como valores medios y máximos de fuerza, potencia, velocidad y rango de movimiento. Esto permitirá su uso tanto para entrenamiento como para evaluación muscular. El trabajo contempla:

1. Investigar y analizar el mercado de equipos de entrenamiento de fuerza.
2. Identificar requisitos y especificaciones iniciales.
3. Realizar el diseño preliminar.

2. Metodología

Para el desarrollo del trabajo se utilizó la metodología Stage-Gate del Industrial Technologies Program (ITP), empleada por el Departamento de Energía de los Estados Unidos para trabajos de innovación [9]. Esta metodología es un método muy utilizado y reconocido para gestionar proyectos de innovación. Este trabajo, debido a las limitaciones de tiempo y presupuesto existentes, solo contempla el avance en las 2 primeras etapas correspondientes a Stage-1 y Stage-2 de la Figura 1. Las etapas son: la investigación preliminar de la tecnología y su análisis (Stage-1), la definición

conceptual de la máquina y las especificaciones técnicas (Stage-2).

Las Stages y Gates son adaptados bajo el contexto del desarrollo de tecnología aplicada al deporte y actividad física, por lo cual estos difieren levemente de las Stage y Gates propuestos por el ITP originalmente. Se espera que con los resultados de este trabajo el dinamómetro multimodal quede en condiciones para avanzar a la etapa de desarrollo conceptual (Stage-3).

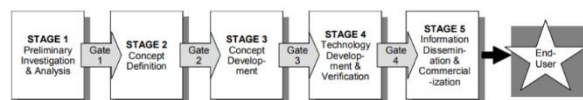


Figura 1. Flujo Stage-Gate. Fuente: (U.S Department of Energy, 2007)

2.1. Etapa 1: Investigación y análisis preliminar

En esta etapa se investiga el estado actual en el rubro de equipos de entrenamiento de fuerza controlados por computadora. Esto permite conocer los avances más recientes y reconocer las características fundamentales de estos dispositivos. Adicionalmente, se realizó un estudio de la dinámica de fuerzas y movimientos durante el ejercicio físico, las cuales son consideradas durante la conceptualización y diseño del equipo. Las actividades que contempla esta etapa son:

- a) *Búsqueda externa:* Se realiza una búsqueda exhaustiva de información sobre dispositivos para entrenamientos de fuerza controlados por computadora en bases de datos académicas, revistas especializadas, sitios web de dispositivos comerciales y patentes disponibles. Las fuentes a consultar: PubMed, IEEE Xplore, Lens y Google Patents, utilizando palabras clave específicas relacionadas con el tema.
- b) *Análisis de productos:* Se estudian los dispositivos comerciales líderes para el entrenamiento de fuerza asistido por computadora, comparando sus características fundamentales. Esta información se contrasta mediante una tabla de comparación que permite detectar o identificar componentes o módulos funcionales críticos. Se aplicó la siguiente metodología de evaluación comparativa:

1. *Búsqueda y selección de productos para comparar:* Se eligen los principales dispositivos según participación de mercado y reseñas.
2. *Definición de características relevantes:* Se identifican características como rango de resistencia variable, rango de movilidad, potencia, costo, funciones extras, volumen y peso de la máquina.
3. *Recolección de información:* Se extrae información desde fichas técnicas o manuales de usuario disponibles en la web.
4. *Análisis comparativo:* Mediante una tabla comparativa, se evalúan los productos seleccionados.

c) *Levantamiento experimental de requerimientos dinámicos*: Se extraen datos sobre las características cinéticas y cinemáticas a partir de la ejecución de dos ejercicios preestablecidos con barra y con cargas sub-maximales, es decir, por debajo de la carga máxima que una persona puede levantar una única vez. Este experimento junto a la información anterior, permite determinar requisitos preliminares para la concepción del dinamómetro multimodo. El estudio se desarrolla de manera similar al presentado en [10] para obtener así las variables dinámicas en el movimiento de la barra, siguiendo un protocolo ya establecido.

1. *Participante*: Atleta masculino de 23 años, especializado en pruebas de 100, 200 y 400 metros planos. Forma parte de la selección de atletismo de la Universidad de la Frontera y participa activamente en campeonatos federados. Su condición física, velocidad, fuerza y familiaridad con los ejercicios lo convertían en el sujeto ideal para evaluar los requisitos mínimos para diseñar el dispositivo.
2. *Protocolo*: El atleta realiza una preparación inicial que contempló un calentamiento completo estándar con el objetivo de aumentar gradualmente la temperatura corporal, el flujo sanguíneo hacia los músculos trabajados, y la movilidad articular [11]. Consiste en 10 minutos de trote continuos en la cinta, además de la ejecución de ejercicios generales de movilidad dinámica para articulaciones de los miembros superiores e inferiores. Posteriormente, el atleta realizó una serie de 10-15 repeticiones con cargas livianas en cada ejercicio a evaluar, priorizando la técnica y preparación de músculos y articulaciones específicas para el posterior trabajo. Este abordaje progresivo busca disminuir el riesgo de lesiones.
3. *Instrumentos*: Para registrar los parámetros cinemáticos, se utiliza un teléfono móvil ubicado en un trípode a 4 metros del plano sagital del deportista y a 1,2 metros del suelo, grabando a una velocidad de 120 cuadros por segundo. La barra poseía un marcador verde en un extremo como referencia para determinar la trayectoria automáticamente. Se utiliza el software de acceso libre Tracker (<https://physlets.org/tracker>) de la plataforma Physlets para el análisis, que permite el seguimiento de marcadores y cálculos automatizados, extrayendo datos espaciales y temporales de cada ejercicio. En la Figura 2 se pueden identificar los diferentes elementos para el análisis dinámico del ejercicio. a) Objeto de estudio: Corresponde al punto o marcador verde de la barra, el cual servirá como punto de seguimiento en el software Tracker. b) Marco de referencia: Es el sistema coordenado para conocer la posición en diferentes instantes. c) Referencia de escala: Permite calibrar las longitudes reales del video al ser un objeto con una longitud calibrada.

Permite calibrar las longitudes reales del video al ser un objeto con una longitud calibrada.

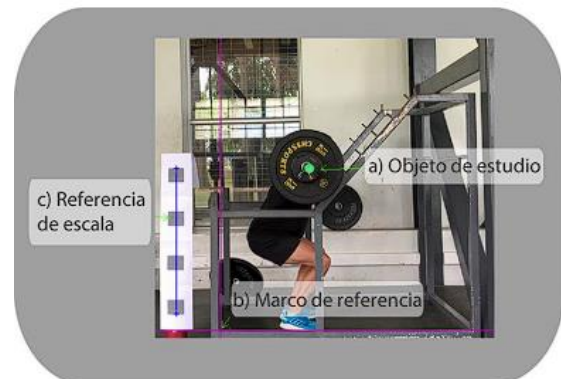


Figura 2. Captura de imagen dentro del software Tracker donde se identifican componentes de referencia y calibración. Fuente: Elaboración propia.

4. *Procesamiento de datos*: Los datos discretos obtenidos del software Tracker, correspondientes a la posición horizontal y vertical del punto de referencia (extremo de la barra) en cada ejercicio, son guardados en una hoja de cálculo en Excel con tres columnas: los datos espaciales X e Y, y los datos temporales T. Este archivo Excel se utilizó como entrada en Matlab, un software de computación numérica utilizado en ingeniería y ciencia para realizar análisis avanzado. Mediante la técnica de suavizado por media móvil, se suavizan los datos para eliminar el ruido y definir las señales de posición. Se calcula la velocidad y aceleración de la referencia en ambas direcciones aproximando las derivadas mediante diferencias finitas hacia adelante. Finalmente, se obtienen los vectores numéricos de diferentes parámetros dinámicos, conociendo la magnitud resultante y orientación angular en cada instante de tiempo durante el movimiento del ejercicio. En la Figura 3 se presenta el flujo de trabajo del experimento que comienza con la captura del movimiento mediante una videocámara.

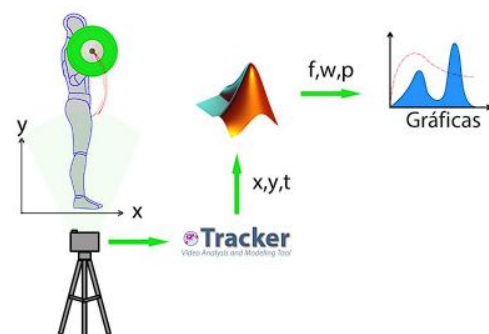


Figura 3. Diagrama de flujo del análisis dinámico. Fuente: Elaboración propia.

2.2. Etapa 2: Definición de concepto

La metodología aplicada en esta etapa se basa en los principios de diseño conceptual de productos de Ulrich & Eppinger [12]. Las actividades realizadas son:

- A. *Definición del problema:* Se analiza en profundidad el funcionamiento requerido del dinamómetro multimodo con base en el diagrama funcional y los modos de ejercicio que debe soportar.
- B. *Establecimiento de especificaciones:* Se determinan las especificaciones preliminares del diseño del dinamómetro, considerando aspectos como la funcionalidad, la seguridad, la ergonomía y los costos.
- C. *Generación de conceptos:* En base a un mecanismo de cabrestante accionado por servomotor para generar la resistencia. Se especifican los subsistemas principales y se exploraron alternativas técnicas para resolver los desafíos identificados.
- D. *Selección de concepto:* Se evalúan dos configuraciones para el sistema y, mediante una matriz de decisión, se selecciona la más apropiada, justificando esta elección.

- E. *Diseño preliminar:* Se esquematizó un diseño preliminar del concepto seleccionado, definiendo la arquitectura principal y el funcionamiento general de los subsistemas y componentes. También se presenta el modelo dinámico del mecanismo de resistencia del dinamómetro.

3. Resultados

3.1. Etapa 1: Investigación preliminar

Análisis de productos: En la etapa de investigación preliminar, se realizó un análisis comparativo de los principales dispositivos de entrenamiento de fuerza disponibles en el mercado. Se seleccionan cinco equipos referentes del mercado actual y se investigaron sus características técnicas y experiencia de usuario. Los modelos seleccionados y sus respectivas empresas son: XS1 de OXefit, Apollo Board de Squatz, Gym Monster de Speediance, Tonal de Tonal y Trainer+ de Vitruvian.

Las características comparadas incluyen: rango de resistencia, modos de peso dinámico, longitud del cable, tamaño, peso de la máquina y potencia. La Tabla 1 resume las características comparadas.

Tabla 1. Comparación de características clave de máquinas de entrenamiento de fuerza. Fuente: Elaboración propia.

Característica	Tonal	Trainer+	Speediance	Apollo Board II	XS1
Rango de resistencia [kgf]	90	200	100	130	113
Modos peso dinámico	5	4	4	5	5
Longitud cable [m]	182	300	-	-	-
Precio [USD]	\$3,995	\$2,900	\$2,899	\$1,709	\$3,999
Tamaño [cm]	129x55x13	12x117x52	185x35x71	19x120x58	207x115x203
Peso de la máquina [kg]	68	38	85	45	158
Potencia [W]	1440	1000	1600	1500	-

Levantamiento experimental de requerimientos dinámicos: Para establecer los requisitos dinámicos preliminares del dinamómetro, se realizan pruebas experimentales con el atleta realizando ejercicios de peso muerto y sentadillas. Las Tablas 2 y 3 presentan los valores de 1RM (una repetición máxima) y sus porcentajes más cercanos a los rangos estándares de evaluación [10] debido a los discos-pesos disponibles.

Los valores cinemáticos y cinéticos de las dos repeticiones realizadas correspondientes a las sentadillas se presentan en las Tablas 4 y 5.

Además, la Figura 4, presenta las 4 gráficas obtenidas en la primera repetición con 39% de 1RM en sentadillas para ejemplificar la dinámica seguida durante el ejercicio. De los gráficos se puede apreciar que, aunque los ejercicios son de movimientos verticales, aun así, generan desplazamientos en el eje

horizontal. Además, se aprecia que la fuerza ejercida por el atleta es variable, en ocasiones menor y en otra mayor al peso de la barra.

Tabla 2. 1RM y porcentajes de trabajo corregidos para Peso Muerto. Fuente: Elaboración propia.

Ejercicio	1RM [kg]	81% [kg]	69% [kg]	62% [kg]	42% [kg]
Peso muerto	130	105	90	80	55

Tabla 3. 1RM y porcentajes de trabajo corregidos para Sentadilla. Fuente: Elaboración propia.

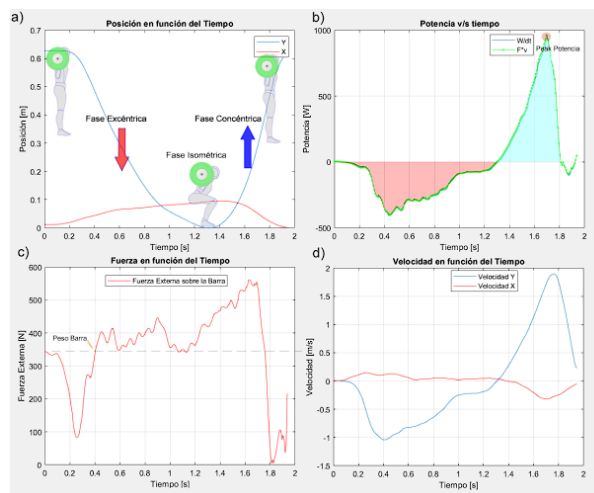
Ejercicio	1RM [kg]	83% [kg]	72% [kg]	61% [kg]	39% [kg]
Sentadilla	90	75	65	55	35

Tabla 4. Valores cinemáticos para la primera y segunda repetición de sentadilla. En (*) valor máximo de ambas repeticiones. Fuente: Elaboración propia.

Características cinemáticas	39%	61%	72%	83%
Velocidad lineal máxima [m/s]	1,92/2,03*	2,48*/2,43	2,16/2,28*	1,82/1,88*
Velocidad lineal media [m/s]	0,65/0,73*	0,86/0,9*	0,75/0,84*	0,73*/0,65
Desplazamiento [m]	0,63*/0,62	0,83/0,87*	0,79/0,81*	0,69/0,71*
Aceleración [m/s ²]	12,92/15,06*	15,68/16,46*	14,7/16,06*	14,19*/13,19

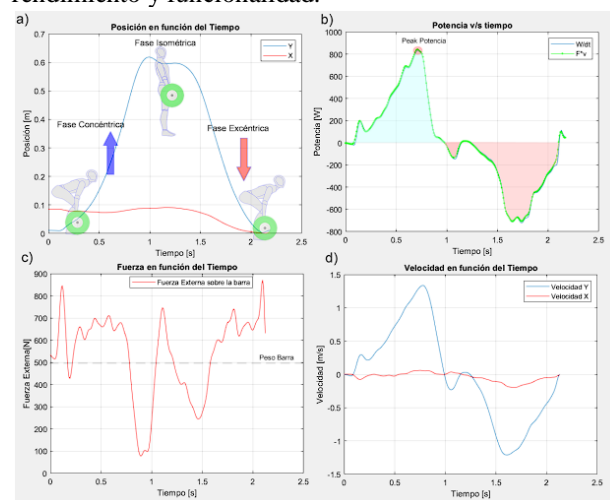
Tabla 5. Valores cinéticos para la primera y segunda repetición de sentadilla. En (*) valor máximo de ambas repeticiones. Fuente: Elaboración propia.

Características cinéticas	39%	61%	72%	83%
Fuerza externa máxima [N]	561,84/623,73*	1050,37*/965,23	1113,39/1161,74*	1318,91*/1217,13
Trabajo externo [J]	437*/431,16	901,9/1071,58*	980,56/1059,33*	976,03/995,82*
Potencia externa máxima [W]	945,31/1100,48*	2221,43*/2092,23	2068,2/2261,43*	2004,05/2090,1*
Potencia externa media [W]	224,76/261,17*	510/517,18*	508,72/582,55*	557,24*/495,15

**Figura 4.** Gráficas de la Primera Repetición con 39% de 1RM en Sentadilla. a) Posición [m], b) Potencia [W], c) Fuerza externa [N], d) Velocidad [m/s]. Fuente: Elaboración propia.

Las Tablas 6 y 7 presentan los valores cinemáticos y cinéticos de ambas repeticiones correspondientes al Peso Muerto. Además, la Figura 5 presenta las 4 gráficas obtenidas en la primera repetición con 42% de 1RM en peso muerto para ejemplificar la dinámica seguida durante el ejercicio.

Los resultados obtenidos permiten identificar los rangos de fuerza y velocidad necesarios para el diseño del dinamómetro multimodal, asegurando su capacidad para proporcionar datos precisos y fiables durante el entrenamiento y la evaluación de fuerza muscular. Estos datos serán fundamentales para ajustar el software de control del dispositivo, optimizando su rendimiento y funcionalidad.

**Figura 5.** Gráficas de la primera repetición con 42% de 1RM en Peso Muerto. a) Posición [m], b) Potencia [W], c) Fuerza externa [N], d) Velocidad [m/s]. Fuente: Elaboración propia.**Tabla 7.** Valores cinemáticos para la primera y segunda repetición de peso muerto. En (*) valor máximo de ambas repeticiones. Fuente: Elaboración propia.

Características cinemáticas	42%	62%	69%	81%
Velocidad lineal máxima [m/s]	1,34/1,44*	1,04*/1,03	0,88/0,95*	0,82/0,85*
Velocidad lineal media [m/s]	0,58/0,67*	0,45/0,56*	0,31/0,45*	0,37/0,4*
Desplazamiento [m]	0,62/0,62*	0,61*/0,60	0,59*/0,59*	0,58/0,59*
Aceleración [m/s ²]	8,42/10,29*	10,58*/9,45	6,2/8,3*	5,43/5,66*

Tabla 8. Valores cinemáticos para la primera y segunda repetición de peso muerto. En (*) valor máximo de ambas repeticiones. Fuente: Elaboración propia.

Características cinéticas	42%	62%	69%	81%
Fuerza externa máxima [N]	989,87*/870,75	1245,9/1537,58*	1440,85/1628,91*	1217,48/1367,27*
Trabajo externo [J]	668,74*/663,74	925,25*/902,08	1012,48/1020,6*	1179,01*/1124,65
Potencia externa máxima [W]	929,41*/840,23	901,32/1077,27*	803,20/889,14*	900,77/943,7*
Potencia externa media [W]	311,72/347,33*	338,57/425,33*	272,02/396,57*	378,08/391,14*

Requisitos dinámicos preliminares: El análisis dinámico permite establecer dos parámetros críticos de desempeño para el diseño del dinamómetro: rango de fuerza y velocidad lineal. La Figura 6 muestra la curva fuerza-velocidad estimada [13]. Esta curva es fundamental para comprender la relación entre la fuerza aplicada y la velocidad de movimiento durante los ejercicios de entrenamiento de fuerza. Al analizar esta relación, se pueden identificar los puntos óptimos para maximizar la potencia generada durante el ejercicio.

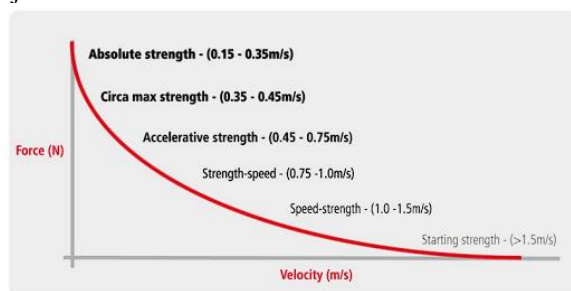


Figura 6. Curva fuerza-velocidad en diferentes rangos de entrenamiento de fuerza [13].

Se establecieron los siguientes parámetros necesarios:

- Rango de fuerza: Hasta 100 kgf o 981 N de fuerza máxima.
- Velocidad lineal: Hasta 1.35 m/s de velocidad lineal máxima.

3.2. Etapa 2: Definición de concepto

Con base en los requerimientos biomecánicos establecidos en la Etapa 1 y la búsqueda externa de equipos similares, se procedió a explorar sistemáticamente posibles conceptos de solución. En la generación de conceptos, el primer paso necesario es aclarar el problema, comprendiendo así en profundidad los desafíos y oportunidades que enfrenta el proyecto y marcando una dirección clara hacia la generación de conceptos.

Problema por resolver: Se busca diseñar un dinamómetro multimodo, el cual es un dispositivo mecatrónico destinado al entrenamiento de fuerza, capaz de entregar una resistencia variable y proporcionar retroalimentación acerca de los datos dinámicos durante el ejercicio. El mecanismo de

transmisión de la resistencia será mediante un cable, el cual, junto a accesorios de sujeción, permitirá al usuario realizar ejercicios con una resistencia similar a las máquinas con sistema de polea (cable-machine). La resistencia será generada por un actuador eléctrico y controlada de manera electrónica, diferenciándose de las máquinas tradicionales que utilizan pesos o elementos de inercia para crear resistencia.

El diagrama funcional de la máquina se muestra en la Figura 7, adaptado del funcionamiento de un dinamómetro isocinético. En este diagrama se identifican cuatro subsistemas importantes en el funcionamiento de la máquina:

1. **Subsistema actuador:** Compuesto por un servomotor y su controlador. El motor, ya sea hidráulico, neumático o electromecánico, proporcionará una carga de resistencia en función de la fuerza realizada por el usuario.
2. **Subsistema de control y comando:** La interfaz usuario-máquina permitirá dar instrucciones de funcionamiento basadas en la configuración elegida por el usuario. Incluye todos los componentes electrónicos necesarios para controlar la máquina.
3. **Subsistema de medición:** Incluye los sensores necesarios para registrar las variables dinámicas del ejercicio, como la fuerza, la velocidad y la posición.
4. **Subsistema de transmisión:** Compuesto por los elementos mecánicos que transmiten la resistencia generada por el actuador al punto de aplicación en el cuerpo del usuario.

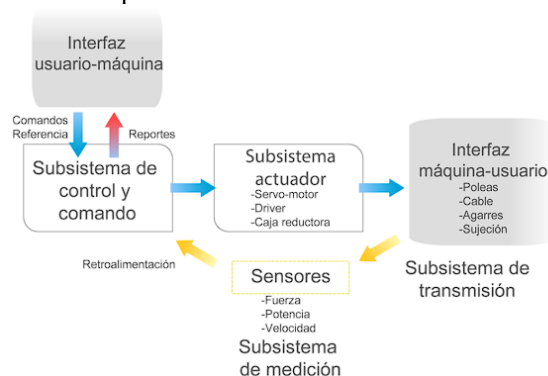


Figura 7. Diagrama funcional del dinamómetro multimodal
Fuente: Adaptado de [5].

Especificaciones del sistema

Las especificaciones del dinamómetro multimodo fueron definidas teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la primera etapa y las características observadas en los equipos similares. Las especificaciones preliminares incluyen:

1. *Rango de fuerza:* Hasta 100 kgf o 981 N de fuerza máxima.
2. *Velocidad lineal máxima:* Hasta 1,35 m/s.
3. *Potencia máxima:* Aproximadamente 1324 W, calculada mediante la multiplicación de la fuerza máxima y la velocidad lineal máxima.

Conceptos de solución

En [14] se propusieron varios conceptos de diseño para el dinamómetro multimodo. Uno de los conceptos iniciales fue un mecanismo de cabrestante accionado por un servomotor para generar la resistencia. Este mecanismo se dividió en los subsistemas principales, y se especificaron algunos conceptos clave para solucionar aspectos técnicos de estos.

Para la selección del concepto más adecuado, se esbozaron dos configuraciones para el sistema y se evaluaron mediante una matriz de decisión, la cual consideró factores como la funcionalidad, la seguridad, la ergonomía y los costos. Se escogió la configuración más apropiada, justificando esta elección con base en los criterios definidos.

Diseño preliminar

El diseño preliminar del concepto seleccionado incluye la definición de la arquitectura principal y el funcionamiento general de los diferentes subsistemas y componentes. En la Figura 8 se presenta el modelo dinámico que rige el mecanismo de resistencia del dinamómetro multimodo, el cual será considerado para etapas posteriores de diseño de control.

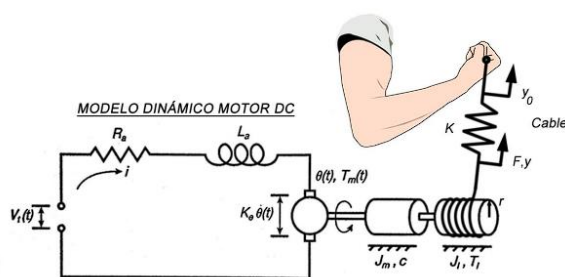


Figura 8. Modelo dinámico de un motor DC aplicado al entrenamiento de fuerza. Fuente: Elaboración propia

Las ecuaciones que describen el sistema son las Ecuaciones (1) y (2):

Ecuación eléctrica:

$$V_t(t) = L_a \cdot \frac{di(t)}{dt} + R_a \cdot i(t) + K_e \cdot \dot{\theta}(t) \quad (1)$$

Ecuación mecánica:

$$T_l(t) - T_m(t) = (J_m + J_l) \cdot \ddot{\theta}(t) + c \cdot \dot{\theta}(t) \quad (2)$$

donde $T_m(t) = K_t \cdot i(t)$.

Reemplazando los valores del vector de estado y vector de entrada y despejando la derivada del vector de estado, la cual contiene los parámetros que dependen de las características físicas del motor y la carga, se puede escribir:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= \begin{bmatrix} -\frac{c}{J_t} & -\frac{K_t}{J_t} \\ \frac{K_e}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{J_t} \\ \frac{1}{L_a} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

Este sistema descrito tiene 2 grados de libertad o 2 variables de estado independientes: la velocidad angular del rotor del motor y la corriente del motor. Estas dos variables representan las cantidades esenciales necesarias para describir el estado dinámico del sistema y ambas pueden variar de forma independiente a lo largo del tiempo. Finalmente, la Figura 9 resume el diseño conceptual del dinamómetro multimodo propuesto.

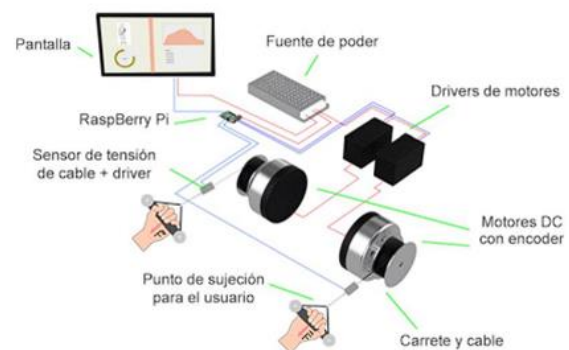


Figura 9. Diagrama del Sistema Completo de Entrenamiento de Fuerza con Motor DC y Controlador Raspberry Pi. Elaboración propia.

4. Conclusiones

En este trabajo se presentó el proceso de diseño preliminar de un dispositivo mecatrónico para el entrenamiento y evaluación de fuerza muscular. Fue necesario destacar los beneficios del entrenamiento muscular y la relación entre biomecánica, mecatrónica y metodologías de desarrollo de productos para el

diseño de un dispositivo de entrenamiento con estas características. La descomposición en etapas del proyecto mediante el método Stage-Gate permitió abordar de manera sistemática las dos primeras etapas: la investigación inicial y la definición de conceptos.

En la revisión externa de dispositivos similares para el entrenamiento de fuerza, se destacó que existe una nueva tendencia hacia el desarrollo de máquinas de entrenamiento más inteligentes y adaptativas. El análisis dinámico de los ejercicios de peso muerto y sentadillas a cuatro porcentajes de carga relativa de una repetición máxima dio un indicativo de los rangos de potencia media (224-582 W), velocidad lineal media (0.31 a 0.9 m/s) y fuerza máxima (561 a 1628 N) durante su ejecución. Estos, junto a los hallazgos encontrados en el análisis comparativo, permitieron determinar los requisitos iniciales para la conceptualización del dinamómetro multimodo. Se requiere más experimentación con diversos sujetos de prueba y ejercicios adicionales para refinar los requerimientos de la máquina antes de proceder con el diseño detallado y construcción de un prototipo físico. Teniendo un mayor número de participantes, con mayor diversidad (edad, género y niveles de habilidad) y con un mayor número de muestras, mayor será la validez y representatividad de los resultados del experimento.

5. Referencias

- [1] Pérez Soriano, P., y Llana Belloch, S. "La Instrumentación en la Biomecánica Deportiva" *Journal of Human Sport and Exercise*, vol. II, n.º II, pp. 26-41, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4100/jhse.2007.22.02>
- [2] Suchomel, T.J., Nimphius, S., Bellon, C.R., y Stone, M.H. "The Importance of Muscular Strength: Training Considerations" *Sports Medicine*, vol. 48, n.º4, pp. 765-785, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0862-z>
- [3] Siff, M.C. "Chapter 6: Biomechanical Foundations of Strength and Power Training". *Biomechanics in Sport: Performance Enhancement and Injury Prevention*. Edited by: Zatsiorsky V.M., Wiley, Enero 2000. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470693797.ch6>
- [4] Westcott, W.L. "Resistance Training is Medicine: Effects of Strength Training on Health" *Current Sports Medicine Reports*, vol. 11, n.º4, pp. 209-216, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1249/JSR.0b013e31825dabb8>
- [5] Ponce Saldías, D. A., D. Martins, C. Martin, F. Da Silva Rosa, C. R. de Mello Roesler, y A. Digiacoimo Ocampo Moré. "Development of a scale prototype of isokinetic dynamometer." *Ingeniare*, Abril de 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052015000200005>
- [6] Varas de la Fuente, E., y González Secunza, E. "Determinación de la normalidad mediante evaluación isocinética de la musculatura del complejo articular del hombro." *Revista Iberoamericana de Fisioterapia y Kinesiología*, Vol 6 , n° 2, pp 81-90, 2003.
- [7] Oxefit. "Oxefit." Oxefit, 2023. [en línea]. Disponible en: <https://www.oxefit.com/>.
- [8] Hamill, J., Knutzen, K., y Derrick, T. *Biomecánica: Bases del movimiento humano*. Barcelona: Wolters Kluwer, 2017.
- [9] U.S Department of Energy. "Stage-Gate y Niveles de Madurez Tecnológica." 2007.
- [10] Balsalobre-Fernandez, C., Geiser, G., Krzyszkowski, J., y Kipp, K. "Validity and reliability of a computer-vision-based." *Journal of Sports Sciences*, vol. 38, n.º 6, pp. 710-716, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1729453>
- [11] Woods, W., Bishop, R., y Green, P. "Dynamic Warm-Up Protocol in the prevention of muscular injury" *Journal of Strength and Conditioning Research*, vol. 21, pp. 222-226, 2007. DOI: <https://doi.org/10.2165/00007256-200737120-00006>
- [12] Ulrich, K.T., y Eppinger, S.D. *Product Design and Development*. 6ª ed. New York: McGraw-Hill Education, 2013.
- [13] Bell, L. "Velocity Based Training: Train Smarter Not Harder for Power and Speed." *Performancelab*, 2020. Disponible en: <https://www.performancelab.com/blogs/fitness/velocity-based-training>.
- [14] Álvarez, B. "Diseño preliminar de un dispositivo mecatrónico para el entrenamiento y evaluación de fuerza muscular". Proyecto de título para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile, 2024.