



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA
EVALUACIÓN ERGONÓMICA DE HERRAMIENTAS DE
LAPAROSCOPIA BASADO LA CAPTACIÓN DE
MOVIMIENTO Y LA SEÑAL DE ELECTROMIOGRAFÍA

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

AUTOR/A: Sancho Fuertes, Ana Mercedes

Tutor/a: Martínez de Juan, José Luís

Cotutor/a: Prats Boluda, Gema

Director/a Experimental: Conejero Rodilla, Andrés

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

**TRABAJO DE FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES**

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA
EVALUACIÓN ERGONÓMICA DE HERRAMIENTAS DE
LAPAROSCOPIA BASADO EN LA CAPTACIÓN DE
MOVIMIENTO Y SEÑALES ELECTROMIOGRÁFICAS**

AUTOR: ANA MERCEDES SANCHO FUERTES

TUTOR: JOSÉ LUIS MARTÍNEZ DE JUAN

CO-TUTOR: GEMA PRATS BOLUDA

TUTOR EXPERIMENTAL: ANDRÉS CONEJERO RODILLA

CURSO ACADÉMICO 2023-2024

A mi madre y a mi padre, porque gracias a ellos hoy soy como soy.

A mi tío, que es como un segundo padre.

A mis dos hermanos, que son lo que más quiero en este mundo.

A mi pequeño y peludo amigo Bamboo, que además de ser un gato estupendo, ha sido mi alegría al final de los días duros.

A mis amigas de toda la vida por seguir estando pese a seguir caminos distintos.

A esas nuevas amistades que han aparecido para quedarse.

Y a todos los profesores que me han dado clase y a los que no, como José Luis, Gema y Andrés. Muchas gracias por enseñarme parte de vuestros conocimientos y, en algunos casos, transmitirme vuestra pasión por la ingeniería.

Gracias a todos y todas por haberme acompañado de una manera u otra durante este camino llamado universidad y del que puedo decir que he disfrutado.

Siempre estaré agradecida.

RESUMEN

La operación laparoscópica es una cirugía incluida en las conocidas como cirugías mínimamente invasivas. A diferencia de las laparotomías, no hay que abrir al paciente. Así que el cirujano deja de tener contacto directo con la cavidad abdominal y pasa a serlo indirecto gracias a la adaptación de la instrumentación. Las ventajas son la rápida recuperación del paciente y la disminución de riesgos de infección. Pero, por otro lado, el cirujano debe realizarlas con instrumentación poco adaptada a sus necesidades físicas, aumentando así los riesgos de padecer fatiga muscular y mental, y con ello, aumentando los riesgos de fallo durante la operación.

El presente trabajo realiza el diseño de un sistema de evaluación ergonómica para herramientas utilizadas en este tipo de intervenciones. Para ello, se dispone de un modelo de simulación de operaciones laparoscópicas, dónde se ha desarrollado un protocolo de intervención quirúrgica con el objetivo de captar simultáneamente el movimiento del usuario y las señales electromiográficas.

El sistema de captación de movimiento, o MoCap, cuenta con tres cámaras de vídeo: frontal, lateral y transversal. Así, se puede tener una visión 3D del torso del usuario durante la simulación. Posteriormente, esos vídeos se analizan con un programa MoCap desarrollado en Python y, para facilitar el análisis postural de las articulaciones que son de interés, el programa cuenta con la integración de las metodologías de ergonomía «Rapid Entire Body Assessment» y «Rapid Upper Limb Assessment».

Por otra parte, las señales EMG se han capturado a través de cuatro canales de un amplificador universal de bioseñales, con un corte paso banda entre 10 Hz y 1kHz, y un sistema de adquisición de señales basado en una tarjeta de adquisición de datos y un instrumento virtual desarrollado en LabView.

Palabras clave: laparoscopia, ergonomía, captura de movimiento, electromiografía.

RESUM

L'operació laparoscòpica és una cirurgia inclosa en les conegudes com a cirurgies mínimament invasives. A diferència de les laparotomies, no s'ha d'obrir al pacient. Així que, el cirurgià, deixa de tindre contacte directe amb la cavitat abdominal i passa a tindre'n d'indirecte gràcies a l'adaptació de la instrumentació. Els avantatges són la ràpida recuperació del pacient i la disminució dels riscos d'infecció. Però, per altra banda, el cirurgià ha de realitzar-les amb instrumentació poc adaptada a les seues necessitats físiques, augmentant els riscos de patir fatiga muscular i mental, i amb això, augmentant els riscos d'error durant l'operació.

Aquest treball realitza el disseny d'un sistema d'avaluació ergonòmica per a ferramentes utilitzades en aquest tipus d'intervencions. Es disposa d'un model de simulació d'operacions laparoscòpiques, on s'ha desenvolupat un protocol d'intervenció quirúrgica amb l'objectiu de captar simultàniament el moviment de l'usuari i els senyals electromiogràfics.

El sistema de captació de moviment, o MoCap, compta amb tres càmeres de vídeo: frontal, lateral i transversal. Així, es pot tindre una visió 3D del tronc de l'usuari durant la simulació. Posteriorment, aquests vídeos s'analitzen amb un programa MoCap desenvolupat en Python i, per facilitar l'anàlisi postural de les articulacions que són d'interés, el programa compta amb la integració de les metodologies d'ergonomia «Rapid Entire Body Assessment» i «Rapid Upper Limb Assessment».

Per altra banda, els senyals EMG s'han capturat mitjançant quatre canals d'un amplificador universal de biosenyals, amb un tall pas banda entre 10 Hz i 1kHz, i un sistema d'adquisició de senyals compost per una tarjeta d'adquisició de dades i un instrument virtual desenvolupat amb LabView.

Paraules clau: laparoscopia, ergonomia, captura de movimiento, electromiografia.

ABSTRACT

Laparoscopic operation is a surgery included in what are known as minimally invasive surgeries (MIS). Unlike laparotomies, the patient does not have to be opened, so the surgeon no longer has direct contact with the abdominal cavity, but indirect contact thanks to the adaptation of the instrumentation. The advantages are the patient's rapid recovery and the reduced risk of infections. On the other hand, the surgeon has to perform surgeries with instrumentation that is poorly adapted to his physical needs, increasing the risk of muscular and mental fatigue, and thus increasing the risk of failure during the operation.

This paper designs an ergonomic evaluation system for tools used in this type of surgery. For this purpose, a simulation model of laparoscopic operations is available where a surgical intervention protocol has been developed with the aim of simultaneously capturing the user's movement and the electromyographic signals.

The motion capture system, or MoCap, has three video cameras: front, side and transverse. This provides a 3D view of the user's torso during the simulation. Subsequently, these videos are analyzed with a MoCap programme developed in Python and, to facilitate the joints of interest's postural analysis, the programme has the integration of the ergonomics methodologies "Rapid Entire Body Assessment" and "Rapid Upper Limb Assessment".

In addition, EMG signals have been captured through four channels of a universal biosignal amplifier, with a bandpass cut-off between 10 Hz and 1kHz, and a signal acquisition system based on a data acquisition card and a virtual instrument developed in LabView.

Keywords: laparoscopy, ergonomics, motion capture, electromiography.

ÍNDICE

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

- A. MEMORIA
- B. PRESUPUESTO
- C. ANEXOS

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Cirugías abdominales.....	1
1.1.1 Laparotomía.....	1
1.1.2 Cirugía laparoscópica.....	1
1.1.1 Procedimiento e instrumentación.....	2
1.1.2 Entrenamiento de cirujanos.....	4
1.2 Ergonomía.....	7
1.2.1 Ergonomía en las cirugías laparoscópicas.....	8
1.3 Biomecánica y anatomía.....	9
1.3.1 Anatomía musculoesquelética y analogía.....	9
1.3.2 Biomecánica y anatomía del brazo.....	11
1.4 Trastornos musculoesqueléticos.....	14
1.4.1 Trastornos musculoesqueléticos asociados a la cirugía laparoscópica.....	14
1.5 Electromiografía.....	16
1.5.1 Músculos y señales de interés.....	17
1.6 Sistemas de captación de movimiento.....	19
1.6.1 Sistemas de captura de movimiento en laparoscopia.....	21
1.7 Sistemas de evaluación de la experiencia del usuario.....	22
2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....	23
2.1 Justificación.....	23
2.2 Objetivo.....	23
2.3 Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	24
3. SISTEMA DESARROLLADO.....	25
3.1 Subsistema de entrenamiento.....	25
3.1.1 Modelo de simulación y herramientas.....	26
3.1.2 Diseño del protocolo de ejercicios.....	27
3.2 Subsistema de registros de señales electromiográficas.....	31
3.2.1 Electrodo.....	31
3.2.2 Amplificador de señal.....	32
3.2.3 Tarjeta de adquisición de datos.....	33
3.2.4 Instrumento virtual para la adquisición de señales.....	33
3.3 Subsistema Motion Capture (MoCap).....	36
3.3.1 Cámaras.....	36

3.3.2 Programa de detección de posturas.....	38
3.3.3 Subsistema de análisis de los datos de movimiento.....	41
3.4 Cuestionario subjetivo User Experience.....	45
5. RESULTADOS.....	47
5.1 Zona de trabajo.....	47
5.2 Señales EMGs registradas.....	48
5.2 Datos de movimiento.....	50
5.2.1 Marcadores de posturas.....	51
5.3 Método RULA.....	52
5.4. Método REBA.....	53
5.5 Cuestionario subjetivo.....	54
5.5.1 Resultados de demanda mental.....	54
5.5.2 Resultados de demanda física durante los ejercicios.....	55
5.5.3 Resultados de demanda física después de los ejercicios.....	56
5.5.4 Resultados de demanda física: comodidad y adaptabilidad.....	57
5.5.4 Resultados de rendimiento.....	58
5.5.5 Resultados de frustración y tiempo de esfuerzo.....	59
6. CONCLUSIONES.....	61
7. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	62

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1. Introducción del presupuesto.....	64
2. Precios descompuestos.....	64
3. Presupuesto de ejecución material.....	65
4. Presupuesto de ejecución por contrata y licitación.....	65

ANEXOS

1. CUESTIONARIO DE USABILIDAD PARA HERRAMIENTAS LAPAROSCÓPICAS.....	67
2. CÓDIGO PYTHON DEL PROGRAMA DE CAPTACIÓN DE MOVIMIENTO.....	74

A. MEMORIA

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA
EVALUACIÓN ERGONÓMICA DE HERRAMIENTAS DE
LAPAROSCOPIA BASADO EN LA CAPTACIÓN DE
MOVIMIENTO Y SEÑALES ELECTROMIOGRÁFICAS

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Cirugías abdominales

Las cirugías han hecho avanzar mucho en los tratamientos y diagnósticos de enfermedades. Las cirugías abdominales son procedimientos que tienen como objetivo localizar, reparar o extirpar partes enfermas que se encuentran en la cavidad abdominal. Actualmente, existen dos técnicas de cirugía abdominal: la laparotomía y la laparoscopia.

1.1.1 Laparotomía

La laparotomía fue el primer tipo de intervención quirúrgica de la cavidad abdominal. Surgió a mitad del siglo XIX y ha jugado un papel muy importante en el diagnóstico y descubrimiento de enfermedades abdominales. Este procedimiento se recomendaba a pacientes que sufrían enfermedades y dolores abdominales conocidos o no. Consiste en realizar una gran incisión en el abdomen para permitir al cirujano acceder al interior de la cavidad abdominal. Una vez abierto, el cirujano puede inspeccionar los órganos y diagnosticar anomalías o enfermedades encontradas, desde abscesos (infecciones en áreas localizadas) hasta perforaciones intestinales o cáncer [1], [2].

Pero esta técnica tiene desventajas. Debido a las grandes incisiones, el paciente corre un alto riesgo de pérdida excesiva de sangre durante la intervención. Además, la recuperación postoperatoria del paciente es lenta, dolorosa y con alta probabilidad de aparición de complicaciones, como pueden ser infecciones en las heridas o mala cicatrización [3].

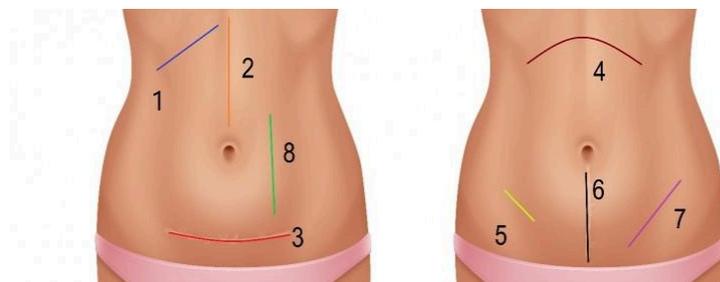


Figura 1. Tipo de incisiones en una laparotomía. Fuente: Tema 1. La cirugía general. (Salusplay)

1.1.2 Cirugía laparoscópica

La primera cirugía laparoscópica se realizó a finales del siglo XX. Y al igual que la laparotomía, ha resultado ser una técnica clave en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades abdominales. La cirugía laparoscópica consiste en intervenir el interior de la cavidad abdominal sin abrir el abdomen del paciente. Para ello, se realizan pequeñas incisiones por donde se introducen las puntas de las herramientas. Mientras, el cirujano controla estas herramientas desde el exterior del cuerpo [4].

La laparoscopia ofrece ventajas al paciente que la laparotomía no. Al realizar incisiones mínimas se reduce el riesgo de pérdida excesiva de sangre del paciente, su recuperación es más rápida e indolora y el riesgo de padecer infecciones postoperatorias disminuye [5], [6].

Por contra, la intervención en sí es más compleja. Por tanto, en estas operaciones se modifica la instrumentación y la técnica del cirujano porque deja de tener contacto directo con la cavidad y órganos abdominales.

1.1.1 Procedimiento e instrumentación

En las operaciones laparoscópicas, el cirujano examina y manipula el interior de la cavidad abdominal desde el exterior a través de pequeñas incisiones en la pared abdominal. El cirujano puede visualizar el interior de la cavidad abdominal mediante un endoscopio rígido llamado laparoscopio, que transmite la imagen a una pantalla.



Figura 2. Laparoscopio. Fuente: *Hipp Endoskop Service*, Freiburg, Alemania. La cámara se encuentra en la parte externa (elemento negro) del laparoscopio.

Estas operaciones consisten en varias etapas [1]:

1. Creación de neumoperitoneo: Se insufla dióxido de carbono (CO_2) a la cavidad abdominal con el fin de tener espacio para poder ver y manipular el interior del abdomen.
2. Instalación de trócares: Una vez insuflado el interior abdominal, se introducen los trócares realizando pequeños cortes en la pared abdominal.
3. Procedimiento quirúrgico: Aquí el cirujano realiza la intervención.
4. Exsuflación y retiro de los instrumentos: se saca el CO_2 y se retiran los instrumentos de la cavidad abdominal, para posteriormente realizar las suturas.

Para entrar por primera vez a la cavidad abdominal, hay dos técnicas distintas: la técnica clásica cerrada y la abierta.

- **Técnica clásica cerrada**: Se utiliza una aguja de Veress para entrar en la cavidad abdominal e insuflar CO_2 , creando una situación de neumoperitoneo (presencia anormal de gas en la cavidad abdominal) antes de la incisión del trocar [7].



Figura 3. Aguja de Veress. Fuente: Mölnlycke

- **Técnica abierta:** Se utiliza un trocar de punta redondeada para realizar la primera incisión de manera controlada.

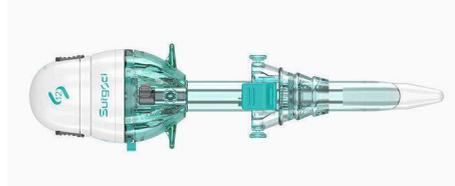


Figura 4. Trocar con fijación de sutura desechable Hasson. Fuente: (Surgsci, n.d.)

La técnica abierta es un método alternativo para crear el neumoperitoneo. En esta técnica la cavidad peritoneal se abre bajo visión directa utilizando un trocar de punta redondeada. Mientras que en la técnica cerrada se requiere de realizar tres pasos a ciegas (inserción de la aguja, insuflación y colocación del trocar), en la técnica abierta tan solo hay un paso a ciegas, que es la inserción del primer trocar. El insuflador de gas se conecta al trocar una vez se encuentra en la cavidad abdominal [7], [8].

Una vez se ha hecho la primera incisión para insuflar el CO₂, se procede a introducir los demás trócares, que hacen de túnel entre el interior y el exterior del paciente [9].

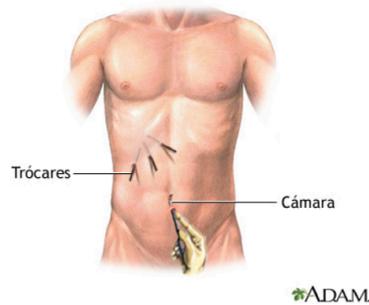


Figura 5. Disposición de cámara o laparoscopia y trócares en el abdomen.

Fuente: Enciclopedia médica A.D.A.M. (MedlinePlus, n.d.)

El trocar es la herramienta que hace de túnel entre el interior de la cavidad abdominal y el exterior. Se compone de una cánula y un obturador. Normalmente, el obturador tiene la punta afilada para facilitar la inserción del trocar a través de la pared abdominal. Una vez insertado, el obturador se puede retirar, manteniendo la cánula instalada y facilitando la introducción del instrumental médico al interior de la cavidad [7], [8].



Figura 6. Cánula y obturador. (Boer, n.d.)

1.1.2 Entrenamiento de cirujanos

El método de aprendizaje de habilidades técnicas en cirugía se basa en el principio Halsted: «mirar, hacer y enseñar». En cambio, este método no es aplicable en la cirugía laparoscópica [10].

En la cirugía laparoscópica se requieren habilidades y técnicas especiales que difieren de la cirugía abierta. Por ejemplo, la coordinación ojo-mano y la orientación espacial en tres dimensiones a través de una pantalla y el trabajo con instrumentos largos que reducen la retroalimentación háptica y aumentan el temblor de la mano. Por ello, la cirugía requiere un entrenamiento previo a la aplicación en intervenciones reales.

Los entrenamientos se realizan en modelos que simulan las condiciones de una operación. Existen modelos de toda clase, desde los más sencillos a los más complejos. Los simuladores pueden dividirse en tres grupos: mecánicos, híbridos o de realidad virtual [11].

- **Simulador mecánico:** Es una caja que semeja el abdomen a través del cual se introducen los instrumentos laparoscópicos. Los instrumentos utilizados en este simulador son similares a los utilizados en una intervención real.
- **Simuladores híbridos:** Son aquellos en los que se emplean tejidos orgánicos en modelos mecánicos. Asimismo, también se utilizan bombas para semejar la pulsación de los vasos arteriales.
- **Simuladores virtuales:** Se define como la interfaz que simula un ambiente digital en el que se permite la interacción con el participante.

Los simuladores mecánicos tienen múltiples ventajas sobre los demás. Son portátiles, reutilizables, económicos, ofrecen la oportunidad de entrenar con los mismos instrumentos que se utilizan durante las cirugías y las dimensiones con las que se trabaja son semejantes al modelo real.

Con los simuladores, se definieron sistemas de evaluación de destreza tanto objetivos como subjetivos. En los sistemas de evaluación subjetiva se evalúan la práctica y los conocimientos teóricos en tiempo real. El gran problema de este sistema de evaluación es que requiere al evaluador/observador en el evento quirúrgico. Por otro lado, los sistemas de evaluación objetiva son buenos para evaluar el desempeño global y por grado de dificultad, puntuando los errores en intervalos de tiempo establecidos según el método de evaluación [12].

Algunos de esos sistemas validados son el *McGill Inanimate System for Training and Evaluation of Laparoscopic Skills*, el *Fundamentals of Laparoscopic Surgery* creado y validado por la *Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons* y el *European training programme in Basic Laparoscopic Urological Skills*, validado y apoyado por la *European Urology Residents Education Programme*.

Algunos de los ejercicios más comunes de estos sistemas son los siguientes:

- **Transferencia de figuras de silicona:** El participante debe mover las piezas de silicona con las herramientas de una fila de columnas a otra.



Figura 7. Ejercicio de entrenamiento de manipulación de objetos blandos. Fuente: (Laparo® Medical Simulators, n.d.)

- **Recorte de patrones:** El participante debe recortar la forma de la plantilla con las herramientas.

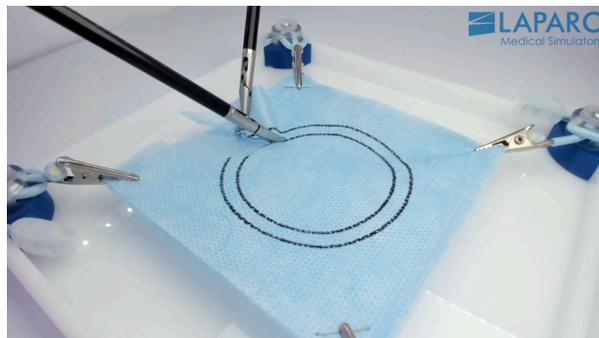


Figura 8. Ejercicio de entrenamiento de corte de patrones. Fuente: (Laparo® Medical Simulators, n.d.)

- **Lazadas hemostáticas:** El participante debe aplicar la lazada preparada en el exterior del abdomen a los apéndices de la imagen.

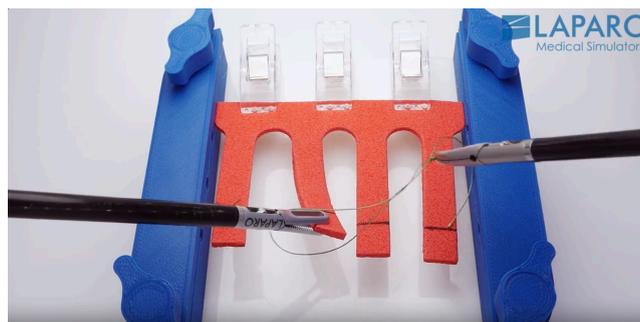


Figura 9. Ejercicio de entrenamiento de lazadas hemostáticas. Fuente: (Laparo® Medical Simulators, n.d.)

- **Nudos extracorpóreos:** El participante debe practicar los nudos que se realizan de manera extracorpórea y aplicarlos a casos en el interior del abdomen.

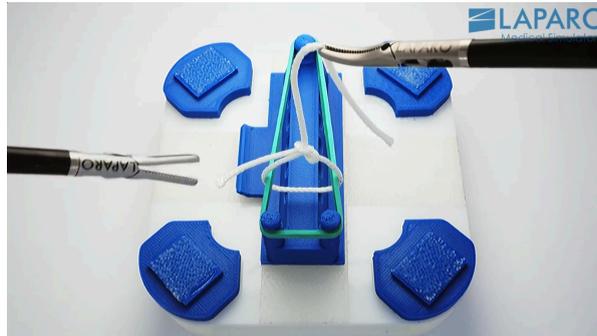


Figura 10. Ejercicio de entrenamiento de nudos extracorpóreos. Fuente: (Laparo® Medical Simulators, n.d.)

- **Nudos intracorpóreos:** El participante debe practicar los nudos que se realizan en el interior del abdomen.

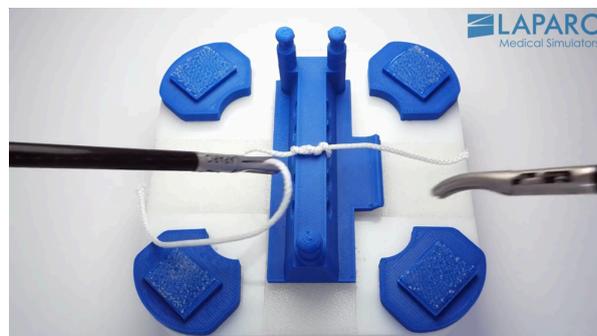


Figura 11. Ejercicio de entrenamiento de nudos intracorpóreos. Fuente: (Laparo® Medical Simulators, n.d.)

- **Guiado de la aguja:** El participante debe practicar el movimiento y la orientación espacial mediante el guiado de una aguja quirúrgica por los ojales del circuito.

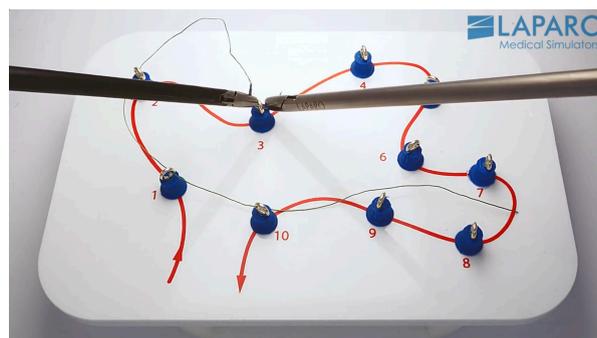


Figura 12. Ejercicio de guiado de aguja Fuente: (Laparo® Medical Simulators, n.d.)

1.2 Ergonomía

La ergonomía debe estar muy presente en las cirugías porque la técnica de las intervenciones laparoscópicas podrían verse afectadas por factores como dolores o incomodidad del cirujano.

La Asociación Española de Ergonomía define la ergonomía como «el conjunto de conocimientos de carácter multidisciplinar aplicados para la adecuación de los productos, sistemas y entornos artificiales a las necesidades, limitaciones y características de sus usuarios, optimizando la eficacia, seguridad y bienestar» [13].

La ergonomía abarca gran cantidad de factores de distinto tipo, por ello se clasifica en distintas áreas de estudio:

- **Ergonomía física o geométrica:** Se centra en el diseño de herramientas y puestos de trabajo con las medidas antropomórficas de las personas trabajadoras. Además, se encarga del estudio de la carga física en todas sus facetas: aplicación de fuerzas, sobreesfuerzos, manipulación de cargas, desplazamientos, posturas de trabajo y movimientos repetitivos.
- **Ergonomía cognitiva:** Está orientada a las necesidades psicológicas de las personas trabajadoras. Algunos ejemplos serían la carga mental, la toma de decisiones, la gestión del estrés o el impacto emocional de los puestos de trabajo.
- **Ergonomía organizacional:** Analiza la relación entre la persona y la empresa o institución. Se tiene en cuenta el tipo de actividades a desempeñar, salario, cultura de la empresa, relaciones personales, posibilidades de crecimiento profesional y personal, etc.
- **Ergonomía ambiental:** Evalúa y asigna los espacios, valorando el confort térmico, acústico, visual y la calidad del aire del ambiente en caso de tratarse de un espacio de trabajo interior. Cabe recalcar que esta área de la ergonomía persigue obtener bienestar ambiental y no higiene ambiental, pues esta segunda disciplina trata de proteger a las personas de enfermedades profesionales y no de aumentar el rendimiento laboral.

Existe una gran variedad de metodologías para la evaluación ergonómica. Se pueden combinar para incluir todos los factores necesarios del caso estudiado. Por ello, estos métodos se pueden clasificar en:

- **Métodos de evaluación global:** Estos métodos permiten tener una visión general de la situación y permiten identificar aquellos factores en los que se hace necesario aplicar un método específico. Un ejemplo pueden ser los cuestionarios que debe rellenar el sujeto.
- **Métodos específicos:** Son métodos que sirven para evaluar factores concretos una vez identificados. Se debe seleccionar el método más adecuado al caso de estudio. Algunos métodos de ejemplo son el *Rapid Upper Limb Assessment* y el *Rapid Entire Body Assessment*.

- **Método *Rapid Upper Limb Assessment* o *RULA***

El método *Rapid Upper Limb Assessment* o *RULA* es un sistema de análisis postural diseñado para detectar en trabajadores su exposición a cargas musculoesqueléticas importantes que pueden derivar en trastornos en las extremidades superiores.

- **Método *Rapid Entire Body Assessment* o *REBA***

El método *Rapid Entire Body Assessment* o *REBA* se desarrolló tomando como base el *RULA* con el objetivo de suplir sus carencias. Ofrece una evaluación más completa de las posturas corporales, incluyendo las extremidades inferiores y evaluando el tronco en extensión.

1.2.1 Ergonomía en las cirugías laparoscópicas

Las cirugías laparoscópicas han mejorado la recuperación de los pacientes. En cambio, han incrementado los problemas de los cirujanos, debido a que necesitan adoptar posturas no neutrales y mayor concentración durante mayor frecuencia.

Las posturas que se adoptan durante este tipo de intervenciones están principalmente influidas por cinco aspectos [6]:

- Posturas corporales estáticas
- Altura de la mesa de cirugía
- Diseño de los agarres del instrumental
- Posición del monitor
- Empleo de pedales para controlar los sistemas de diatermia (transmisión de corrientes de alta frecuencia en el interior del cuerpo del paciente)

En concreto, las posturas estáticas no neutras son adoptadas por el uso de herramientas con agarres que no se adaptan bien a la mano. Estas posturas causan dolor en cuello y muñecas y mayor fatiga en los músculos del antebrazo y mano [14], [15]. La fatiga y el dolor puede afectar al procedimiento en sí, disminuyendo la precisión de los movimientos y aumentando los riesgos para el paciente.

Si estas condiciones se sufren durante un largo periodo de tiempo, los cirujanos pueden llegar a desarrollar trastornos musculoesqueléticos. Por ello, es importante tener en cuenta las necesidades ergonómicas y biomecánicas del cirujano durante el diseño del agarre de la instrumentación.



Figura 12. Procedimiento laparoscópico para la reparación de una hernia inguinal. Fuente: («Las Ventajas De La Cirugía Laparoscópica En Hospital Parque Vegas Altas», 2020)

1.3 Biomecánica y anatomía

La biomecánica es la disciplina que evalúa el movimiento y las cargas en el cuerpo humano cuando se encuentra en determinada postura o realizando una determinada actividad. Y tiene el objetivo de identificar alteraciones o desajustes anatómicos que perjudiquen la salud de la persona.

Para realizar esta tarea, se establece la analogía entre el cuerpo humano y una máquina compuesta de palancas y poleas. Así es posible aplicar las leyes de la mecánica y determinar si existen sobrecargas durante la ejecución de un esfuerzo.

1.3.1 Anatomía musculoesquelética y analogía

El sistema locomotor o esquelético-muscular, está formado por la unión de los huesos (estructura o palanca), las articulaciones (punto de apoyo) y los músculos (potencia), constituyendo un conjunto de sostén, protección y movimiento del cuerpo humano.

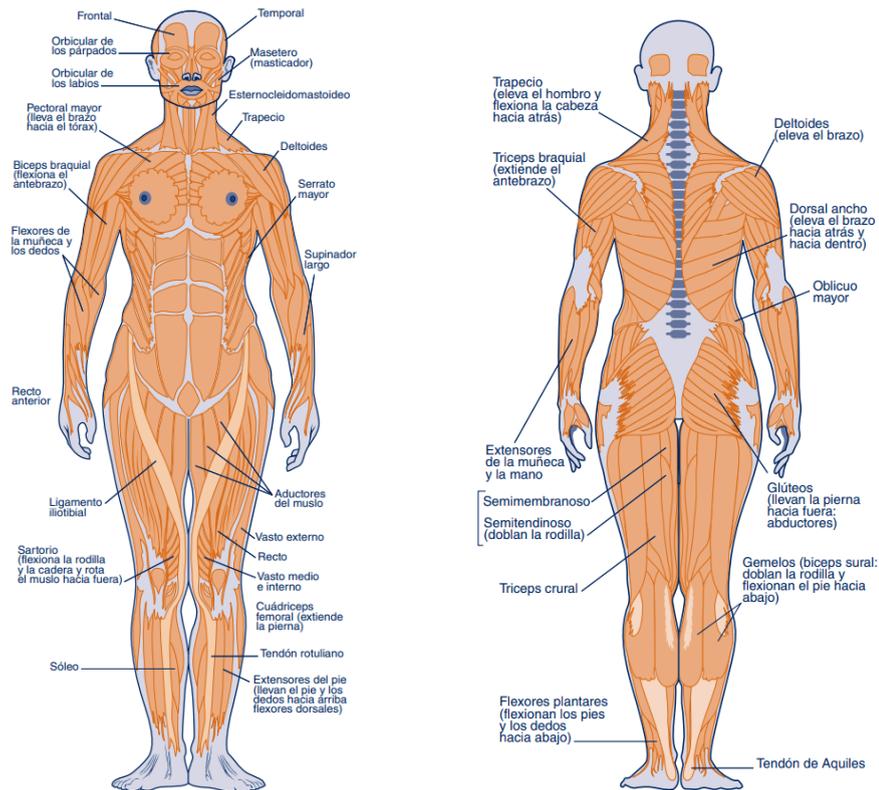
- **Huesos:** Constituyen, junto con los cartílagos, la estructura que da forma y sostiene al cuerpo. Sirven para proteger determinados órganos internos y además colaboran en la formación de células sanguíneas y el almacenamiento de sales minerales.
- **Articulaciones:** Son las conexiones existentes entre los huesos o los cartílagos. Las articulaciones pueden variar mucho de una a otra, pues generalmente están especializadas en determinadas funciones. Sin embargo, pueden presentar algunas características estructurales y funcionales comunes.
- **Músculos:** Su principal característica es la contracción, hecho que permite producir el movimiento. Hay tres tipos de musculatura, pero la más abundante y la que permite el movimiento de las articulaciones, es la musculatura estriada o esquelética. Esto es gracias a su capacidad de contraerse bajo el control nervioso consciente del ser humano.

Los músculos estriados se pueden clasificar de distintas formas, y una de ellas es según su acción:

ACCIÓN	DEFINICIÓN (Ejemplo)
Flexores	Disminuyen el ángulo de una articulación (bíceps braquial)
Extensores	Aumentan el ángulo de una articulación (tríceps braquial)
Elevadores	Elevan una parte del cuerpo (elevador de la escápula)
Depresores	Descienden una parte del cuerpo (depresor del labio inferior)
Abductores (separadores)	Mueven un apéndice lejos de la línea media (deltoides)
Aductores (aproximadores)	Mueven un apéndice hacia la línea media (aductor mediano)
Rotadores	Hacen girar un hueso sobre su eje longitudinal (esternocleidomastoideo)

Supinadores	Rotan para que la palma de la mano mire hacia delante (supinador corto)
Pronadores	Rotan para que la palma de la mano mire hacia atrás (pronador redondo)
Inversores	Dirigen la planta del pie hacia dentro (tibial anterior)
Eversores	Dirigen la planta del pie hacia fuera (peroneo anterior)

Tabla 1. Clasificación de los músculos según su acción. Fuente: Unidad 5. Sistema esquelético-muscular. Procedimientos relacionados. (Ed. McGraw-Hill, n.d.)



Figuras 13 y 14. Algunos músculos del cuerpo (cara anterior, izq) (cara posterior, dcha). Fuente: Unidad 5. Sistema esquelético-muscular. Procedimientos relacionados. (Ed. McGraw-Hill, n.d.)

1.3.2 Biomecánica y anatomía del brazo

Una vez comprendida la analogía entre el cuerpo humano y un sistema de palancas y poleas, se procede a analizar la biomecánica y movimientos del brazo. Para ello, se explican los movimientos de las articulaciones que componen el sistema «brazo».

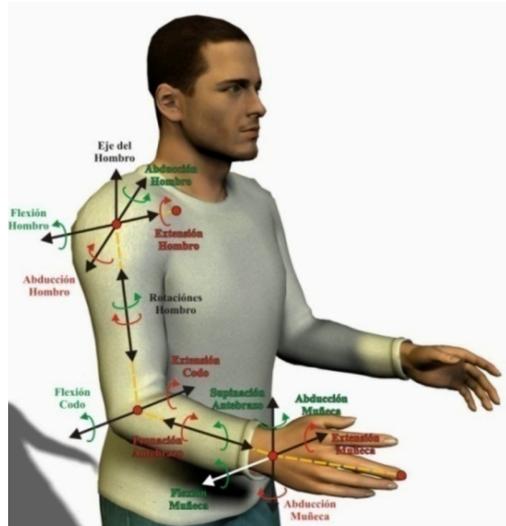


Figura 15. Movimientos del miembro superior. Fuente: (Bautista Rojas et al., 2012)

- **Articulación del hombro:** Encargada de unir la escápula y la clavícula con el húmero. Se consideran los siguientes movimientos:

MOVIMIENTO	EJECUCIÓN	RANGO DE MOVILIDAD	MÚSCULOS PRINCIPALES	MÚSCULOS AUXILIARES
Flexión	Eleva el miembro superior hacia delante	Hasta los 180°	Deltoides Pectoral mayor	Coracobraquial Subescapular Bíceps
Extensión	Lleva el miembro superior hacia detrás	Hasta los 60° u 80°	Pectoral mayor (desde la flexión) Dorsal ancho Redondo mayor	Deltoides Tríceps
Abducción	Desplaza el miembro superior hacia fuera	Hasta 180°	Deltoides Supraespinoso	Subescapular Bíceps
Aducción	Desplaza el miembro hacia la línea medial del cuerpo	Hasta los 50°	Pectoral mayor Subescapular Dorsal ancho	Coracobraquial Subescapular Bíceps Tríceps
Rotación interior con el	Con el codo en flexión a 90°, lleva el	Hasta los 90°	Coracobraquial Dorsal ancho	Deltoides Supraespinoso

brazo en abducción a 90°	antebrazo hacia abajo		Redondo mayor Pectoral mayor	Bíceps
Rotación exterior con el brazo en abducción a 90°	Con el codo en flexión a 90°, lleva el antebrazo hacia arriba	Hasta los 90°	Infraespinoso Redondo menor	Deltoides

Tabla 2. Biomecánica del hombro. Fuente propia.

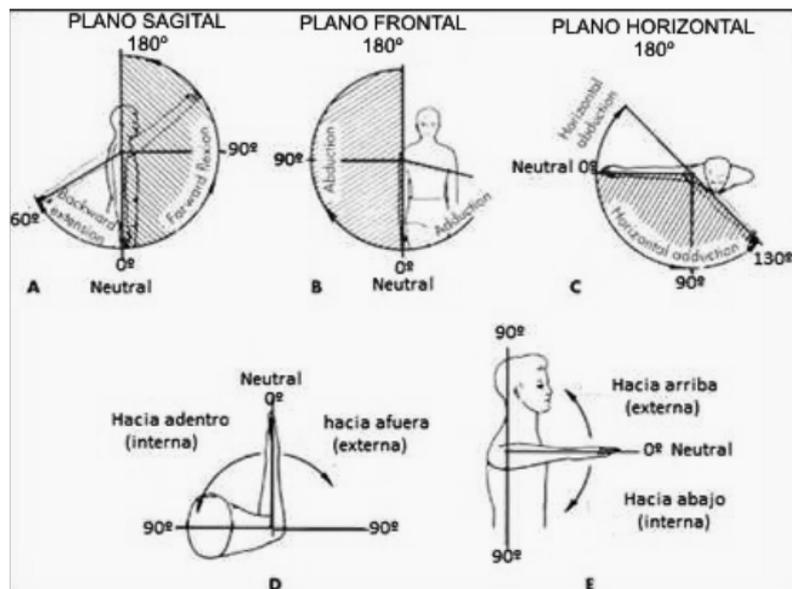


Figura 16. Movimientos del hombro. Fuente: (Dr. Arturo Mahiques)

- **Articulación del codo:** Encargada de la unión del húmero con el cúbito y el radio. Se consideran los siguientes movimientos:

MOVIMIENTO	EJECUCIÓN	RANGO DE MOVILIDAD	MÚSCULOS PRINCIPALES
Flexión	Acerca la palma de la mano al brazo	Hasta 146°	Bíceps braquial Braquial anterior Supinador largo
Extensión	Aleja la mano del brazo	Desde los 146° de la flexión a la posición de reposo a 0°	Tríceps Ancóneo
Pronación	Rotación sobre el eje del húmero hacia el ombligo	Hasta 90°	Pronador redondo Pronador cuadrado
Supinación	Rotación sobre el eje del húmero hacia fuera	Hasta 90°	Supinador largo Supinador corto

Tabla 3. Biomecánica del codo. Fuente propia.

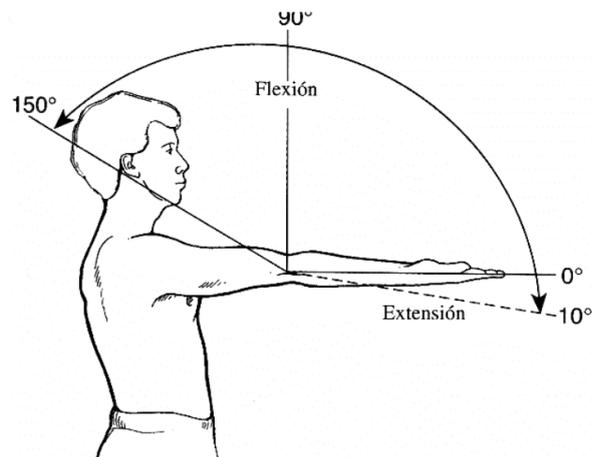


Figura 17. Movimientos del codo. Fuente: (Dr. Emilio L. Juan García)

- **Articulación de la muñeca:** Encargada de unir el cúbito y el radio, o antebrazo, con la mano. Los movimientos descritos por esta articulación son:

MOVIMIENTO	EJECUCIÓN	RANGO DE MOVILIDAD	MÚSCULOS PRINCIPALES
Flexión	Acerca la palma al antebrazo	Hasta los 90°	Palmar menor
Flexión + desviación radial	Acerca la palma al antebrazo y hacia la línea media	Flexión hasta los 90° + Desviación radial hasta los 20°	Palmar mayor
Flexión + desviación cubital	Acerca la palma al antebrazo y hacia fuera	Flexión hasta los 90° + Desviación cubital hasta los 40°	Cubital anterior
Extensión	Aleja la palma del antebrazo	Hasta los 80°	Segundo radial
Extensión + desviación radial	Aleja la palma del antebrazo hacia la línea media	Extensión hasta los 80° + Desviación radial hasta los 20°	Primer radial
Extensión + desviación cubital	Aleja la palma del antebrazo hacia fuera	Extensión hasta los 80° + Desviación cubital hasta los 40°	Cubital superior
Pronación	Con el codo en flexión a 90°, gira la palma hacia abajo	Hasta 90°	Pronador cuadrado Braquiorradial
Supinación	Con el codo en flexión a 90°, gira la palma hacia arriba	Hasta 90°	Supinador Braquiorradial

Tabla 4. Biomecánica de la muñeca. Fuente propia.

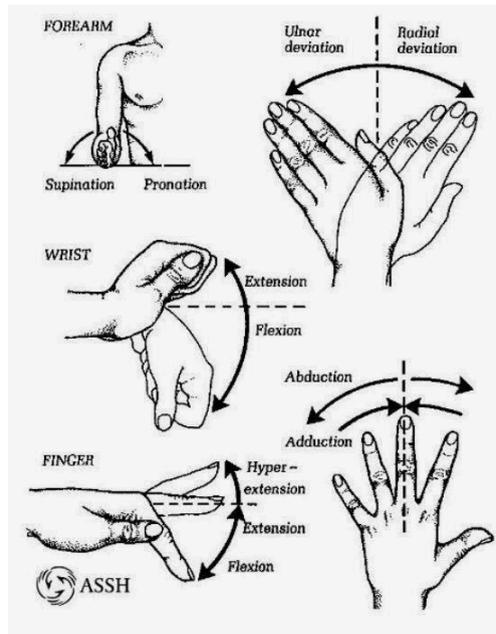


Figura 18. Biomecánica de la mano. Fuente: (ASSH)

1.4 Trastornos musculoesqueléticos

Los trastornos musculoesqueléticos, o TME, se desarrollan por movimientos repetitivos, posturas forzadas o situaciones de descompensación de fuerzas en las articulaciones. Estos trastornos son lesiones específicas que afectan a huesos, articulaciones, músculos, tendones y nervios. La mayoría de los TME relacionados con el trabajo, se desarrollan con el tiempo. Suelen provocar dolor y limitación de la movilidad, de la destreza y del nivel general de funcionamiento. Esto puede causar una disminución de la capacidad de trabajo de la persona que las sufre, derivando incluso hasta la incapacidad completa según su gravedad.

Las localizaciones más frecuentes dónde se sufren estas lesiones son en el tren superior, es decir, espalda, cuello, hombros y extremidades superiores.

1.4.1 Trastornos musculoesqueléticos asociados a la cirugía laparoscópica

Alrededor del 12% de los cirujanos de laparoscopia padecen de dolor o entumecimiento frecuente en el cuello, hombros, brazos o muñecas durante el 20% del tiempo de la intervención. En comparación con las operaciones abiertas, el esfuerzo muscular requerido para realizar una operación laparoscópica es un 24% mayor [14].

La poca libertad postural por las limitaciones del instrumental, junto con esfuerzos extra, pueden causar e incluso agravar los trastornos si ya se padecen con anterioridad. La mayoría de estos trastornos y síntomas se dan en los cirujanos de menor y mayor edad. Porque, de acuerdo con la curva de aprendizaje, los más jóvenes adoptan posturas poco adecuadas que les causan molestias; a su vez, en los cirujanos mayores existen problemas degenerativos que pueden incrementar los síntomas [16].

Las principales lesiones que padecen los cirujanos son:

- Síndrome de Quervain

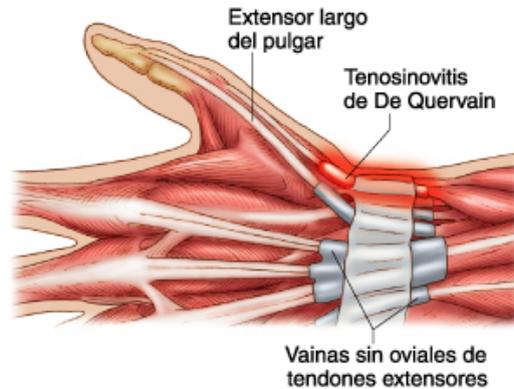


Figura 19. Ligamento inflamado que causa el síndrome de Quervain. Fuente: Mayo Clinic

- Codo de tenista o epicondilitis lateral crónica



Figura 20. Zona afectada por el codo de tenista. Fuente: Mayo Clinic

- Codo de golfista o epicondilitis medial crónica

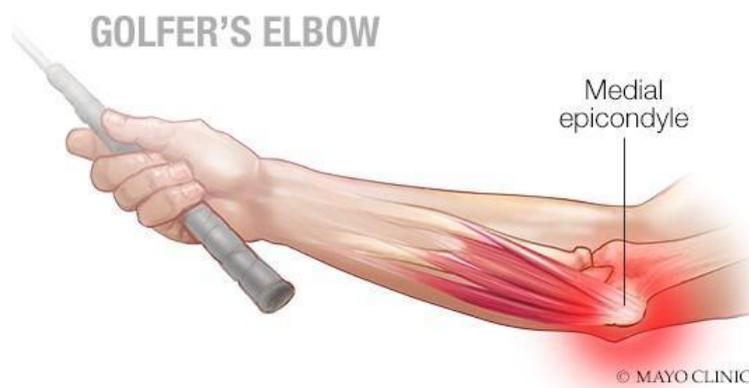


Figura 21. Zona afectada por el codo de golfista. Fuente: Mayo Clinic

- Lesión de los manguitos rotadores o bursitis subacromial, producida por la abducción repetida y forzada del brazo por encima de los 90° y 100°

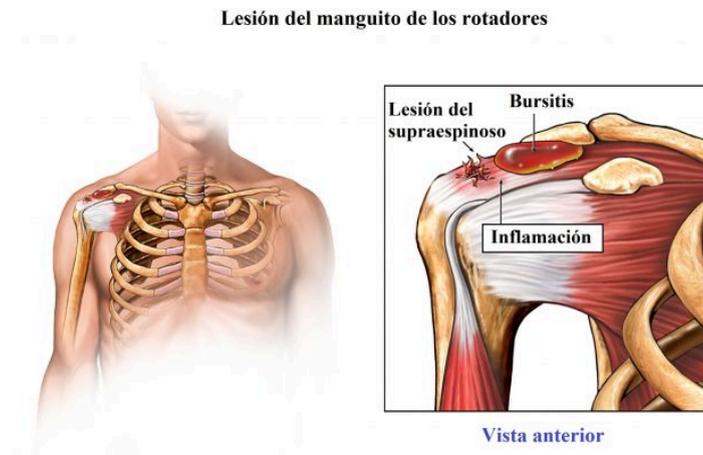


Figura 22. Lesión del manguito de los rotadores. Fuente: A.D.A.M.

1.5 Electromiografía

La electromiografía (EMG) se refiere a la captación de la señal eléctrica colectiva de los músculos, que es controlada por el sistema nervioso y producida durante la contracción muscular. Hay dos tipos de señal EMG:

- **EMG intramuscular (EMGi):** Se registra la actividad muscular mediante un electrodo invasivo o intramuscular con forma de aguja insertado en el músculo a través de la piel. Las EMGi son más precisas, pues los electrodos adquieren mejores señales y pueden acceder a fibras musculares individuales. Por contra, este tipo de registro de señal, puede ser doloroso.



Figura 23. Electrodo de aguja en EMG invasiva. Fuente: (U.S. National Library of Medicine, 2016)

- **EMG de superficie (EMGs):** Se registra la actividad muscular desde la superficie de la piel que cubre el músculo mediante varios electrodos superficiales no invasivos que son adheridos a la piel, evitando el dolor que infligen los electrodos de aguja al sujeto. En cambio, estos electrodos no obtienen señales con tanta fidelidad ni precisión, aunque sí de calidad aceptable.

Existen una gran variedad de tamaños y formas para medir los potenciales bioeléctricos en la superficie del cuerpo. Pero para medir EMGs se emplean los más pequeños, pues su superficie y localización es muy importante y estos permiten una mayor precisión. Dentro de los electrodos superficiales pequeños se encuentran los electrodos de placas, los de copa de succión y los flotantes.

Actualmente, los más utilizados son los electrodos flotantes. En ellos se elimina el contacto directo del electrodo con la piel y, con ello, los artefactos del movimiento. El único camino conductor entre el metal y la piel es el gel o pasta electrolítica. Suelen ser desechables, con conectores de cierre de botón que sí son reutilizables.



Figura 24. Diagrama de electrodo superficial del tipo flotante. Fuente: (UNAM)

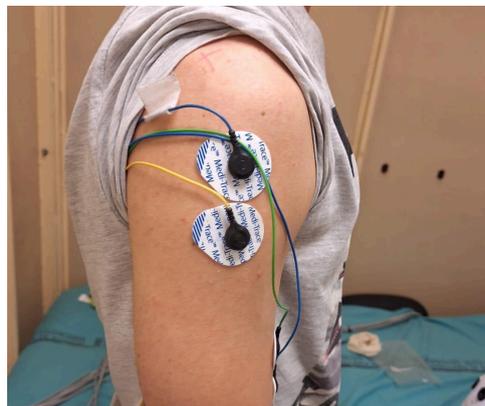


Figura 25. Electrodos superficiales del tipo flotante. Fuente propia.

1.5.1 Músculos y señales de interés

De acuerdo con los dolores y trastornos musculoesqueléticos que desarrollan los cirujanos debido a las posturas adoptadas durante las intervenciones laparoscópicas, se decide que se va a realizar la captación de señales de los cuatro músculos más afectados de la extremidad superior derecha.

Empezando en la muñeca, los movimientos más repetidos durante esta cirugía son el giro de muñeca y la pronación de la misma. Para realizar estos movimientos, se activa principalmente el músculo braquiorradial del antebrazo.

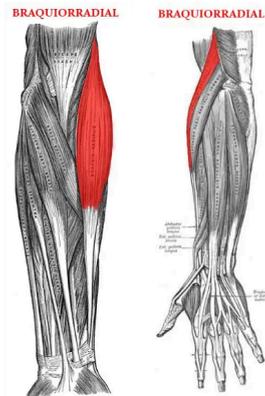


Figura 26. Músculo braquiorradial. Fuente: Fisioterapia Intuitiva

Subiendo al codo, el movimiento más común en las cirugías laparoscópicas es la flexión. En este movimiento participa principalmente el bíceps braquial. Además, el bíceps también interviene en la abducción del hombro, siendo la abducción una de las posturas más estáticas y frecuentes que se dan durante las intervenciones de laparoscopia.

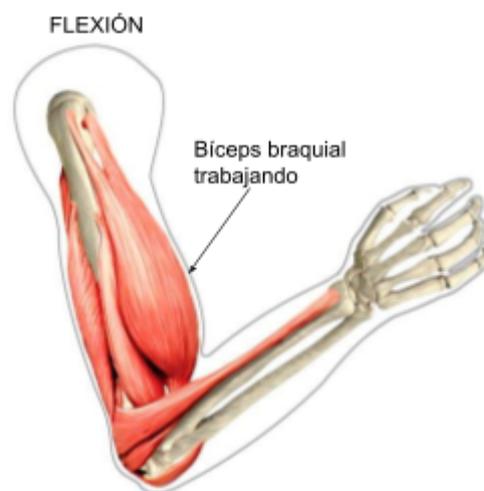


Figura 27. Músculos que intervienen en la flexión del codo. Fuente: Edición propia de imagen obtenida de Your House Fitness

En el hombro, las posturas y movimientos que se realizan con mayor frecuencia durante estas operaciones son la abducción y la flexión del miembro. Como se ha mencionado más arriba, el bíceps participa en la abducción del brazo junto con el deltoides. Y en la flexión del brazo también interviene principalmente el deltoides con apoyo del bíceps y otros músculos.



Figura 28. Músculo deltoides medial. Fuente: MyProtein

Finalmente, el cuarto músculo que se va a analizar y que es el causante de los dolores de espalda, cuello y cabeza cuando se inflama, es el trapecio. Este gran músculo se divide en tres partes, el superior, el medio y el inferior. La parte de mayor interés para este estudio es la parte superior del trapecio, pues esta es la responsable de la elevación y circunducción del hombro. Ambos movimientos se dan con gran frecuencia en los cirujanos, mayoritariamente en los cirujanos más inexpertos.

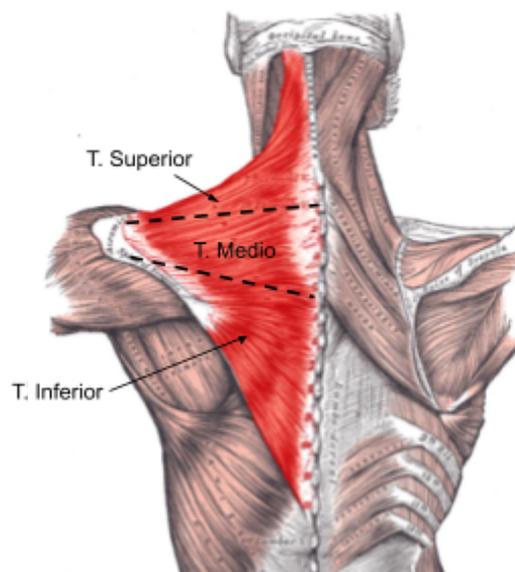


Figura 29. Músculo trapecio. Fuente: Edición propia de imagen obtenida de atlas del cuerpo Humano

1.6 Sistemas de captación de movimiento

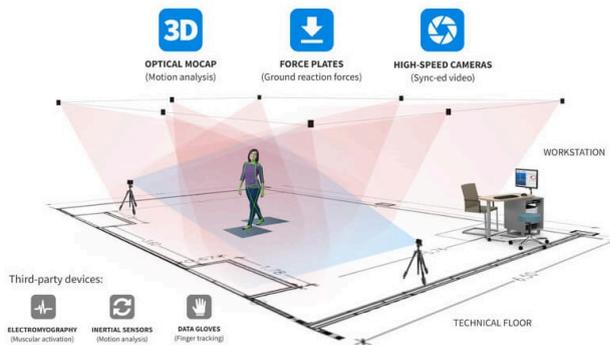
La captura de movimiento, o *Mocap* (abreviatura de *motion capture* en inglés), es la tecnología que registra digitalmente el movimiento de personas, animales u objetos.

La captura de movimiento se emplea en distintos sectores:

- **Cine y televisión:** Se suele utilizar para dar vida a los guiones gráficos, ayudando a los directores a definir el movimiento en una escena y preparar los efectos visuales.
- **Videojuegos:** El mocap es una forma rápida y eficaz para desarrollar una gran biblioteca de movimientos para los personajes del videojuego, dándole así más realismo y calidad.
- **Militar:** Junto con la realidad virtual, la captura de movimiento permite mejorar el entrenamiento militar.
- **Salud y deportes:** En este sector se utiliza principalmente para diagnosticar lesiones y ayudar con la rehabilitación, teniendo siempre de base la biomecánica.

Hay cuatro sistemas que permiten capturar el movimiento:

- **Sistemas Ópticos:** Los sistemas ópticos pasivos y los ópticos activos se componen de cámaras y marcadores que permiten rastrear y ubicar en el espacio la posición y cada una de las acciones que realiza el sujeto. Suelen ser sistemas muy caros, complejos y poco flexibles.



Figuras 30. Sistema óptico de captación de movimiento. Fuente: STT Systems



Figura 31. Sistema óptico de captación de movimiento con traje de marcadores. Fuente: Wikipedia

- **Sistemas inerciales:** Estos sistemas no cuentan con cámaras, se componen de un traje que cuenta con acelerómetros y magnetómetros ubicados en posiciones relevantes del cuerpo, que miden los movimientos del sujeto en referencia a un punto fijo. Permiten una captura en cualquier lugar, sin necesidad de realizar instalaciones complejas, aunque el sujeto debe llevar el traje.



Figura 32. Traje de sistema inercial de captación de movimiento. Fuente: Xsens

- **Sistemas a base de *software* de vídeo:** Este sistema emplea cámaras pero no son necesarios marcadores ni trajes o sensores. Consta de un *software* que permite rastrear las posiciones del sujeto a partir de un vídeo. En algunos sistemas se están usando componentes de inteligencia artificial para mejorar la calidad de las capturas. Son bastante sencillos de implementar y cuentan con grandes rangos de precios.

Hasta ahora los sistemas *Mocap* más utilizados, han sido los sistemas ópticos, dejando en segundo lugar los inerciales. Pero actualmente, los sistemas *Mocap* sin marcadores basados en *software* de video se están volviendo cada vez más populares debido a su facilidad de uso. Además, permiten realizar proyectos con presupuestos más bajos en comparación con los demás.

Tecnología	Sistemas líderes	Fortalezas	Debilidades
Sistemas ópticos con marcadores	Vicon BTS	-Precisión -Procesamiento datos -Animación 3D -Realidad virtual y aumentada -Gran cantidad de aplicaciones -Estudios de alta complejidad	-Tiempo de adecuación del espacio y del sistema -Alto coste -Sistema robusto -Oclusión de marcadores -Estudios deportivos -Espacio limitado
Sistemas ópticos sin marcadores	Kinect	-Coste del equipo -Fácil manipulación -Procesamiento datos -Precisión en parámetros espaciotemporales -Telerehabilitación	-Precisión en parámetros angulares -Estudios de alta complejidad
Sistemas magnéticos	Xsens	-Estudios deportivos -Portabilidad -Fácil manipulación -Realización de estudios fuera del laboratorio -Coste del equipo	- Precisión -Estudios de alta complejidad

Tabla 5. Características de los sistemas de captura de movimiento. Fuente: (Gómez Echeverry et al., 2018)

1.6.1 Sistemas de captura de movimiento en laparoscopia

Los sistemas más populares son el sistema Vicon y el sistema Kinect.

El sistema Vicon es el sistema de referencia dentro del mundo de la captura de movimiento. El gran problema de este sistema es que para este tipo de estudios no son muy apropiados. Son necesarias alrededor de 10 cámaras que graban el movimiento de la persona, dificultando la localización de estas para poder evaluar a los cirujanos en una simulación o en un quirófano. Además, estas cámaras pueden costar sobre los 6.500€ cada una.

El sistema Kinect ofrece buenos resultados con tan solo 2 cámaras. Pero el problema es que la colocación del sujeto debe ser exacta para que las proporciones detectadas por ambas cámaras sean equivalentes y los datos obtenidos sean válidos. Y recolocar al sujeto en la posición correcta sin alterar los resultados es muy difícil.

Por otro lado, existe un *software open source* llamado *Tracker Vídeo Analysis* que es capaz de seguir los píxeles del vídeo utilizando visión artificial. Para utilizar este sistema solo son necesarias dos cámaras que deben colocarse a la misma distancia del sujeto y a 90° entre ellas: una frontal al sujeto y otra a la derecha del sujeto. Los sujetos deben diferenciarse de los marcadores, por ello es necesario que haya contraste entre los marcadores y el fondo: los marcadores deben ser negros y el fondo blanco. El problema de este sistema es la sincronización de las cámaras y la necesidad de utilizar marcadores.

Es por esto que se ha decidido seguir el camino del *software Tracker Vídeo Analysis*, y desarrollar un programa que sea capaz de detectar las posiciones del sujeto sin marcadores y tenga la capacidad de sincronizar las cámaras involucradas. Para ello, se va a optar por utilizar librerías que utilizan la inteligencia artificial para detectar posturas.

1.7 Sistemas de evaluación de la experiencia del usuario

Normalmente la experiencia del usuario, o *user experience (UX)*, es un concepto que se relaciona con el uso de aplicaciones web y móviles. Pero también se puede trasladar al mundo físico. El objetivo de mejorar la experiencia del usuario es satisfacer las necesidades de quien utiliza un producto para que lo siga usando.

El diseño *UX* se centra en que el producto sea útil, accesible, intuitivo y que presente alguna novedad frente a lo existente. Para poder diseñar esa experiencia es muy importante el *feedback*, o la retroalimentación de los usuarios. Y para conseguir esa retroalimentación existen sistemas de evaluación de experiencia como los cuestionarios.

En estos cuestionarios se intenta obtener información objetiva de sensaciones subjetivas, que mediante ponderaciones se convierte en información relevante para el diseño del producto. Además, son tests completamente personalizables, con el fin de obtener la información deseada.

2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

2.1 Justificación

Resumidamente, las operaciones laparoscópicas consisten en intervenir la cavidad abdominal del paciente mediante pequeñas incisiones, lo que deriva en la mejor y más rápida recuperación de los pacientes. Pero, debido a la mala ergonomía de las herramientas clásicas utilizadas, los médicos deben adoptar posturas y realizar movimientos que a la larga derivan en lesiones musculoesqueléticas.

Debido a esto, el Centro de Investigación e Innovación en Bioingeniería y el Instituto de Diseño y Fabricación plantearon una línea de investigación para la mejora ergonómica y experiencia del usuario final. De esta línea de investigación salió la patente de un prototipo modelo basado en la libertad postural. Sin embargo, al no existir un sistema estandarizado de revisión del diseño de estas herramientas, la evaluación de este prototipo frente a la herramienta clásica es demasiado subjetiva y variable.

Por ello, se ha planteado realizar en este trabajo un sistema de evaluación ergonómica eficaz para este tipo de herramientas dónde también se tenga en cuenta la información subjetiva de los sujetos.

2.2 Objetivo

El objetivo del presente trabajo es diseñar e implementar un sistema integral para evaluar la ergonomía de las herramientas utilizadas en las operaciones laparoscópicas. En él se pretende integrar la evaluación de las señales EMGs, las imágenes posturales y encuestas de experiencia de usuario, también conocida como *user experience* o *UX*.

Para conseguir esto, se debe:

- Diseñar el protocolo de ejercicios a seguir, fabricando los componentes necesarios para realizar los ejercicios de entrenamiento quirúrgico.
- Desarrollar el sistema de adquisición señales EMGs, basándose en LabView como entorno de programación de instrumentos virtuales.
- Desarrollar el sistema de captación de movimiento, creando el entorno de captura y el *software* de adquisición de movimiento basado en *MediaPipe Pose*.
- Desarrollar el cálculo automático y la visualización de los resultados ergonómicos de los métodos *REBA* y *RULA*.
- Diseñar y desarrollar el cuestionario *UX* para la posterior contestación de los sujetos de ensayo.
- Revisar el sistema completo ensayando con sujetos que deben realizar los ejercicios de aprendizaje de cirugía laparoscópica.

2.3 Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible son 17 objetivos globales diseñados para «ser un plan para lograr un futuro mejor y más sostenible para todos» [17].

Este trabajo guarda estrecha relación con dos de esos 17 objetivos. En concreto:

- Objetivo 3: Salud y bienestar.
- Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructuras.

Aunque al menos el 80% de los residentes MIR, son capaces de realizar cirugías laparoscópicas básicas, ese porcentaje baja conforme sube la dificultad de la operación. Las operaciones avanzadas ya son lo suficientemente complejas como para realizarlas con instrumentación incómoda y poco intuitiva. Por eso, este trabajo está tan ligado a los objetivos 3 y 9 de los ODS. Porque busca crear un sistema innovador capaz de medir la ergonomía de las herramientas utilizadas. Facilitando el proceso de diseño de estas y conseguir, en un futuro, mayor comodidad y disminución de la curva de aprendizaje de los médicos para realizar este tipo de cirugías. Conseguir eso supone hacer más accesibles este tipo de intervenciones más complejas, logrando así mayor cobertura sanitaria.

3. SISTEMA DESARROLLADO

Se ha diseñado un protocolo de registro compuesto por cuatro subsistemas. Como entrada, el protocolo cuenta con el subsistema de entrenamiento. Como salida, el protocolo registra los datos de EMGs, captura de movimiento (*MoCap*) y evaluación de *user experience* (*UX*).

El subsistema de entrenamiento es un protocolo de ejercicios diseñado para que el sujeto ponga en práctica los movimientos más habituales en una cirugía laparoscópica.

El subsistema de registro de EMGs es el encargado de recopilar la actividad muscular con el fin de conocer la fuerza aplicada y fatiga derivada del subsistema de entrenamiento.

El subsistema de captura de movimiento se encarga de obtener las posiciones de las articulaciones del sujeto mientras éste realiza el protocolo de ejercicios del subsistema de entrenamiento. Posteriormente, esos datos se analizan en el sub-subsistema de análisis de movimiento.

Finalmente, el subsistema de evaluación de *user experience* recopila, mediante un cuestionario, las impresiones y sensaciones del sujeto sobre la herramienta utilizada durante el protocolo de ejercicios.

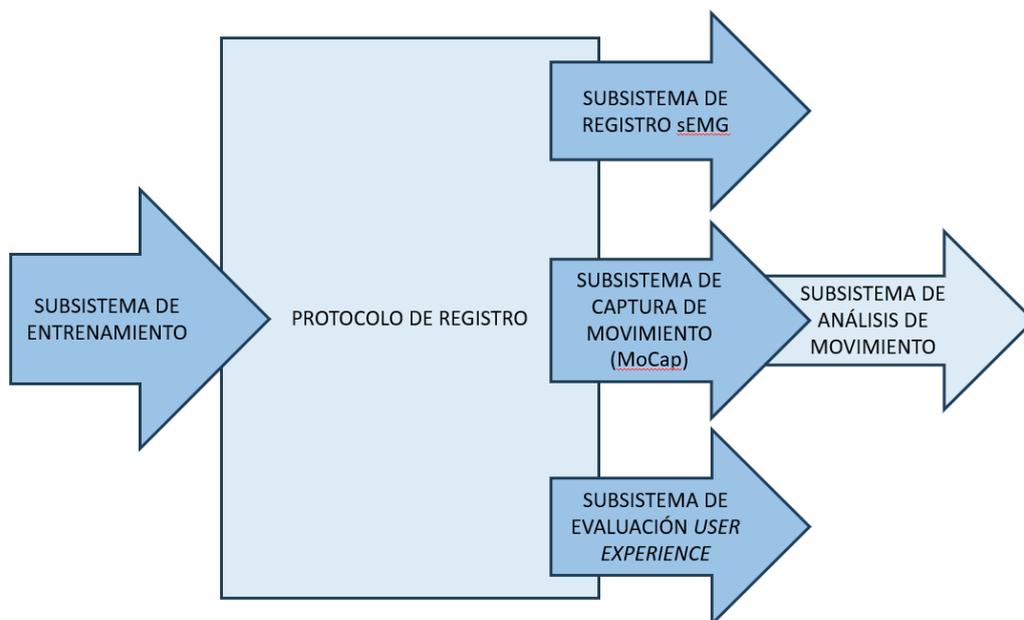


Figura 33. Esquema de las partes del sistema de evaluación desarrollado. Fuente propia.

3.1 Subsistema de entrenamiento

El subsistema de entrenamiento es la base de este trabajo. En él se definen las herramientas utilizadas y los ejercicios estáticos y dinámicos que debe realizar el sujeto para proporcionar la información muscular y postural deseada que se desea analizar.

3.1.1 Modelo de simulación y herramientas

Los modelos de simulación donde se entrenan las habilidades de los cirujanos, se llaman endotrainers.

Se ha utilizado el pelvitainer modelo Aspire versión estándar de la marca *Laparo® Medical Simulators*. Este modelo cuenta con ocho puntos de acceso a instrumentos de 5 mm, un soporte de cámara ajustable, una cámara HD e iluminación LED. Además, el set cuenta con cuatro instrumentos laparoscópicos de entrenamiento: un disector, una pinza, unas tijeras y un porta agujas y 24 kits de sutura. También incluye cuatro módulos de entrenamiento para realizar los 37 ejercicios de la plataforma *LAPARO Academy*.



Figura 34. Entrenador laparoscópico Aspire ver. Standard. Fuente: *Laparo® Medical Simulators*.

Las herramientas que se van a utilizar para los ejercicios son la pinza y la punta disectora.



Figura 35. Punta pinza. Fuente: *MyMedical Store*.



Figura 36. Punta disectora. Fuente: *MyMedical Store*.

Los ejercicios se han realizado con módulos diseñados a partir de los módulos que proporciona el set del endotrainer. Se ha utilizado el módulo de precisión del set de *Laparo® Medical Simulators* y se ha diseñado e impreso en 3D otros dos módulos.



Figura 37. Módulo de precisión.
Fuente: *Laparo® Medical Simulators*.

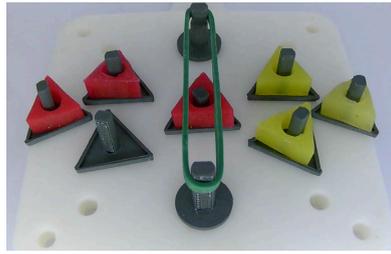


Figura 38. Módulo 1 de habilidad. Fuente propia.



Figura 39. Módulo 2 de habilidad. Fuente propia.

3.1.2 Diseño del protocolo de ejercicios

Se define como protocolo la secuencia que se sigue para obtener los registros de las señales musculares y los vídeos de movimiento.

El protocolo consta de dos tipos de ejercicios: ejercicios estáticos y dinámicos. Los ejercicios estáticos están diseñados para obtener órdenes de magnitud de las señales musculares de cada individuo. En cambio, los ejercicios dinámicos tienen como objetivo detectar los movimientos y posturas que provocan incomodidad y mayor fatiga muscular en los músculos con gran tendencia a desarrollar lesiones por la actividad de la cirugía: el músculo braquiorradial, el bíceps, el deltoides y el trapecio superior.

- **Ejercicios estáticos**

El primer ejercicio estático resulta ser un minuto en reposo. El sujeto debe estar con los brazos relajados y con las manos vacías. Con este ejercicio se obtiene una señal base que, posteriormente, permite calibrar las demás señales obtenidas de ese mismo sujeto.



Figura 40. Vista lateral de la postura estática en reposo.
Fuente propia



Figura 41. Vista frontal de la postura estática en reposo.
Fuente propia.



Figura 42. Vista superior de la postura estática en reposo.
Fuente propia.

En el segundo ejercicio estático, el sujeto debe permanecer durante un minuto en posición de entrada al pelvitainer. El sujeto debe coger la herramienta laparoscópica y colocar la punta de la herramienta en la entrada del trocar sin llegar a entrar. Con esta postura estática tan extrema, se pretende simular las peores condiciones posturales en este tipo de cirugías. De ella se extrae el esfuerzo máximo que puede realizar el músculo.



Figura 43. Vista lateral de la postura de entrada al pelvitainer. Fuente propia.



Figura 44. Vista lateral de la postura de entrada al pelvitainer. Fuente propia.

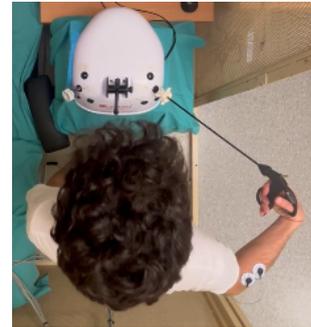


Figura 45. Vista superior de la postura de entrada al pelvitainer. Fuente propia.

Con estos dos ejercicios, se tendría definido el rango del electromiograma de cada sujeto. Con esta información se normalizan las señales de todos los sujetos.

El tercer ejercicio estático se realiza durante un minuto dónde el sujeto debe estar marcando sin apoyar el centro del pelvitainer con la punta de la herramienta. Esta posición estática es la menos exigente de las que se puede llegar a adoptar durante este tipo de cirugías. De ella se extrae el mínimo esfuerzo que va a realizar el músculo durante este protocolo.



Figura 46. Vista lateral de la postura de marcado del centro del interior del pelvitainer. Fuente propia.



Figura 47. Vista frontal de la postura de marcado del centro del interior del pelvitainer. Fuente propia.



Figura 48. Vista superior de la postura de marcado del centro del interior del pelvitainer. Fuente propia.

- **Ejercicios dinámicos**

Los ejercicios dinámicos constan de dos partes. La primera parte son tres ejercicios de dos minutos cada uno, donde se registra la señales musculares y el movimiento en vídeo. La segunda parte consta de dos ejercicios de cinco minutos cada uno en los que solo se registra el movimiento.

Los ejercicios de la primera parte son los descritos a continuación.

El primer ejercicio dinámico es llamado ejercicio de los triángulos. En este ejercicio, el sujeto debe mover los triángulos del módulo de un lado a otro. Para ello, debe tardar como máximo dos minutos.



Figura 49. Estado del módulo al empezar el ejercicio de los triángulos. Fuente propia.



Figura 50. Estado del módulo al finalizar el ejercicio de los triángulos. Fuente propia.

El segundo ejercicio dinámico es llamado ejercicio de la goma. En este ejercicio y durante dos minutos, el sujeto debe estirar la goma verde del centro hacia los centros de los triángulos. La secuencia que debe seguir es:

Lado izquierdo:

- 1 → Centro
- 2 → Centro
- 3 → Centro

Cambio al lado derecho de la goma:

- 4 → Centro
- 5 → Centro
- 6 → Centro

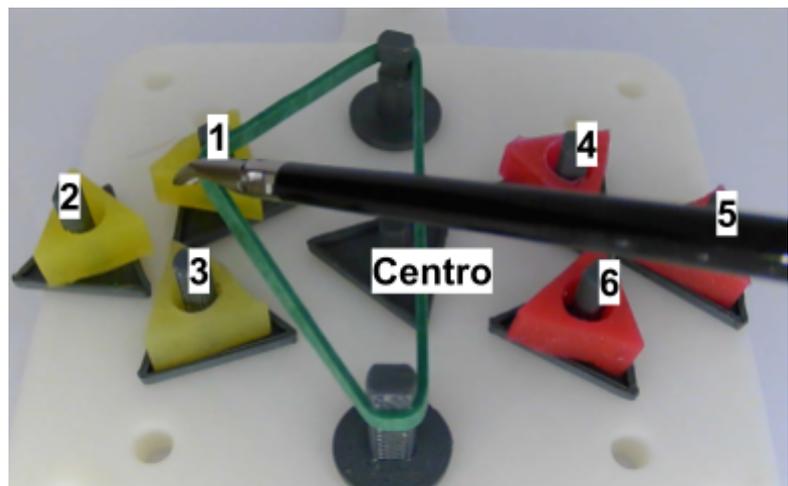


Figura 51. Secuencia a seguir en el ejercicio de la goma con los triángulos marcados. Fuente propia.

El tercer ejercicio dinámico es llamado ejercicio del ocho. En él, el sujeto debe estar realizando giros en la goma de forma que forme un ocho, y volviendolos a deshacer durante dos minutos.



Figura 52. Goma retorcida en forma de ocho. Fuente propia.

Una vez terminada la primera parte de los ejercicios dinámicos, se procede a realizar la segunda parte.

El primer ejercicio de la segunda parte es de precisión. Consiste en coger una de las bolas con la pinza de la izquierda del recipiente circular, pasarla a las pinzas disectoras de la mano derecha, y dejar esta bola en uno de los recipientes rectangulares del módulo.

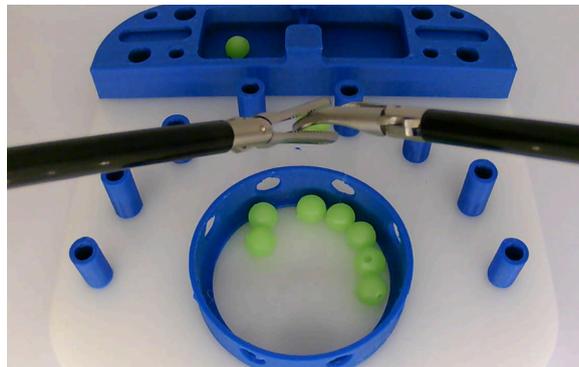


Figura 53. Ejercicio de traspaso de bolas. Fuente propia.

El segundo ejercicio consiste en enhebrar el hilo por los ojales del circuito.

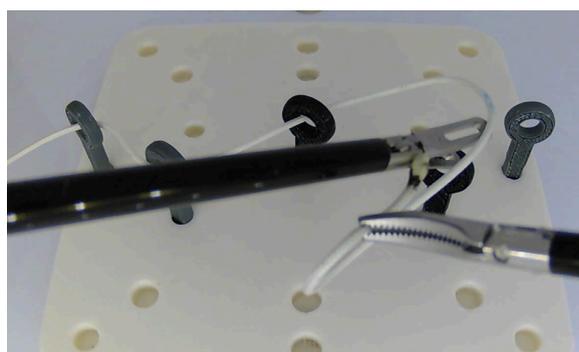


Figura 54. Ejercicio de enhebrar el hilo. Fuente propia.

3.2 Subsistema de registros de señales electromiográficas

Para captar las señales EMGs, se necesita de un sistema de adquisición compuesto por electrodos, un amplificador de señal, una tarjeta de adquisición de datos y un software de tratamiento de señales.

Los electrodos se encargan de captar la señal. Después, el amplificador de señal acondiciona la captura de los electrodos. La tarjeta de adquisición de datos se encarga de traducir las señales analógicas a señales digitales con las que el ordenador puede trabajar. Finalmente, un instrumento virtual diseñado en LabView procesa las señales.

3.2.1 Electrodo

Los electrodos utilizados son de tipo flotante adhesivo de la marca Kendall® de Cardinal Health.

Sus características son:

Forma / Tamaño	Lágrima / 35 mm de diámetro
Superficie total del producto	1017 mm ²
Área de gel	401 mm ²
Área adhesiva	616 mm ²
Área del sensor	78,5 mm ²
Grosor del producto (excluyendo el adaptador)	0,8 mm
Tipo de adaptador	Broche / Corchete
Material de soporte	Espuma de Polietileno blanco, goma EVA
Características de adherencia	Adhesivo acrílico de grado médico
Características del gel	Hidrogel conductor y adhesivo
Sensor	Polímero de carbono recubierto de Ag/AgCl
Material del adaptador/conector	Latón niquelado

Tabla 6. Características de los electrodos utilizados. Fuente propia.

Los electrodos son los encargados de recibir la señal del músculo. Por ello su colocación es importante. A continuación, se define, según el proyecto europeo *Surface EMG for Non-Invasive Assessment of Muscles* o *SENIAM*, la colocación de los electrodos para la recepción de la señal de cada músculo de interés [18].

Los electrodos deben colocarse por conjuntos de tres. Dos son los que reciben la diferencia de potencial entre sí y el tercer electrodo es la referencia. En este caso, el electrodo de referencia es común a todos los músculos, por tanto solo es necesario uno: se encuentra colocado en la muñeca.

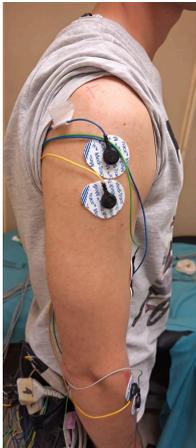
MÚSCULO	Trapezio superior	Deltoides medial	Bíceps braquial	Músculo braquiorradial
COLOCACIÓN DE LOS ELECTRODOS				

Tabla 7. Colocación de los electrodos. Fuente propia.

3.2.2 Amplificador de señal

La señal adquirida por los electrodos se pre-procesa con el amplificador de señal. El amplificador utilizado es de la marca Grass Instruments, modelo P511.

Como las señales obtenidas son del orden de 50 μV hasta 5 mV, es necesario amplificarlas. En este caso, se amplifica con una ganancia de 5000. Además, las señales mioeléctricas que se desean analizar se encuentran en un rango de frecuencias de 10 Hz a 1kHz, por ello se aplica un ancho de banda en ese intervalo de frecuencias. A esto, hay que sumarle el filtrado de 50 Hz que otorga una jaula de Faraday instalada en la zona de trabajo para evitar interferencias de cualquier dispositivo eléctrico y electrónico del exterior.

El amplificador tiene siete canales, de los cuales sólo se utilizan los cuatro primeros. Siendo el canal 1 las señales adquiridas del músculo braquiorradial, el canal 2 las señales del bíceps, el canal 3 las señales del deltoides y el canal 4 las señales del trapecio.



Figura 55. Amplificador de señal AC P511 de Grass Instruments. Fuente propia.

3.2.3 Tarjeta de adquisición de datos

La tarjeta de adquisición de datos es la USB-6229 de National Instruments. Para ser detectada por el ordenador que recibe las señales adquiridas, es necesario instalar el software de National Instruments.



Figura 56. Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6229. Fuente propia.

3.2.4 Instrumento virtual para la adquisición de señales.

Como parte de este proyecto, se ha desarrollado un instrumento virtual en LabView capaz de visualizar en tiempo real las señales adquiridas por los cuatro canales del amplificador. Una vez terminada la adquisición de señales, se guardan los datos en un archivo '.dat' .

LabView es un entorno de programación gráfica, creado por *National Instruments* en 1976, para el desarrollo de sistemas de pruebas desde un enfoque intuitivo y capaz de conectarse con cualquier instrumento e interfaz de usuario. Todo instrumento virtual (VI) consta de dos partes, el panel frontal y el diagrama de bloques.

Panel frontal del VI:

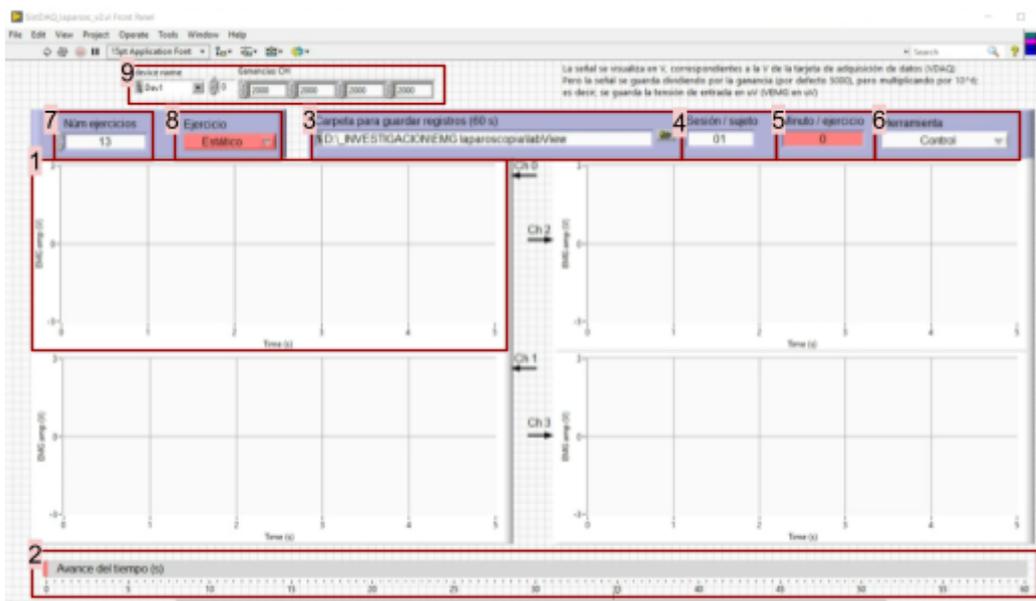


Figura 57. Panel frontal del VI con sus partes señaladas. Fuente propia.

A continuación, una descripción de cada una de sus partes:

- 1: Representación de la señal electromiográfica en tiempo real. El intervalo sólo muestra cinco segundos de señal en el eje X, y un rango de -3 a 3 V de amplitud en el eje Y.
- 2: Barra de tiempo. Esta barra representa sesenta segundos, unidad de tiempo utilizada para los ejercicios. Los ejercicios que duran dos minutos, cumplen dos ciclos de la barra del tiempo.
- 3: Directorio dónde se van a guardar los archivos de datos capturados. El usuario puede poner el directorio en el que desea que se guarden los datos.
- 4: Número identificatorio de la sesión o sujeto.
- 5: Minuto en el que se encuentra la adquisición de datos.
- 6: Selección del tipo de herramienta que se está utilizando durante la adquisición. El usuario puede cambiar el tipo de herramienta antes de iniciar la adquisición de señales.
- 7: Número de ejercicios/minutos que se van a realizar en la sesión. El usuario puede editarlo antes de empezar la sesión.
- 8: Tipo de ejercicio que el usuario está realizando. Antes de empezar la adquisición, el usuario puede escoger con qué tipo de ejercicio quiere empezar.
- 9: Dispositivo desde el que se obtienen las señales y ganancias que se le aplican a esas señales.

Diagrama de bloques del VI: obtiene la información de la sesión a través de los *inputs* que ha proporcionado el usuario a través de **3, 4, 6 y 7**. El dato **7** indica el número de bucles que debe hacer la VI. Dentro de ese bucle se encuentran cuatro secuencias que se ejecutan paralelamente.

La secuencia 0 es la encargada de crear los ficheros donde se guardarán las señales en la dirección que el usuario ha definido en **3** con el nombre definido en **4**.

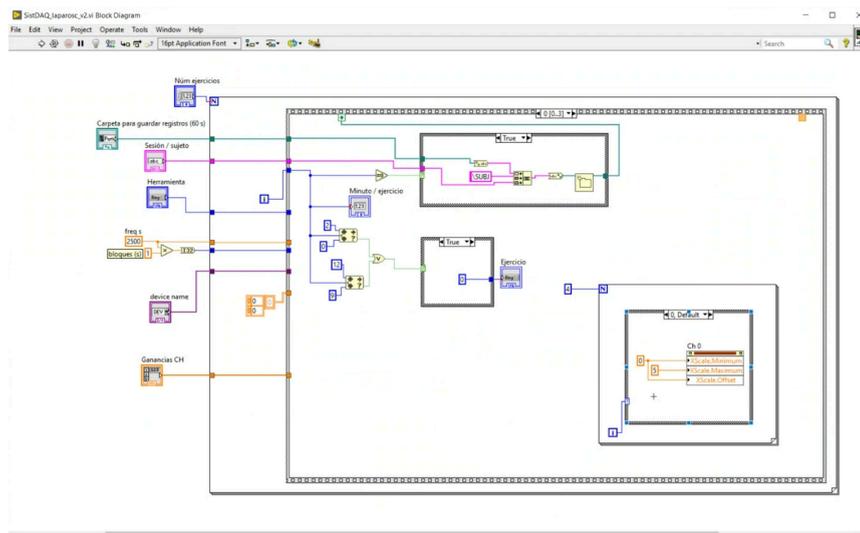


Figura 58. Diagrama de bloques del VI. Mostrándose la secuencia 0. Fuente propia.

La secuencia 1 cuenta los minutos y cuando llega a 11 minutos, pausa la adquisición para poder realizar la segunda parte de los ejercicios dinámicos. Además, muestra un mensaje con un botón para continuar con la adquisición cuando el usuario considere oportuno.

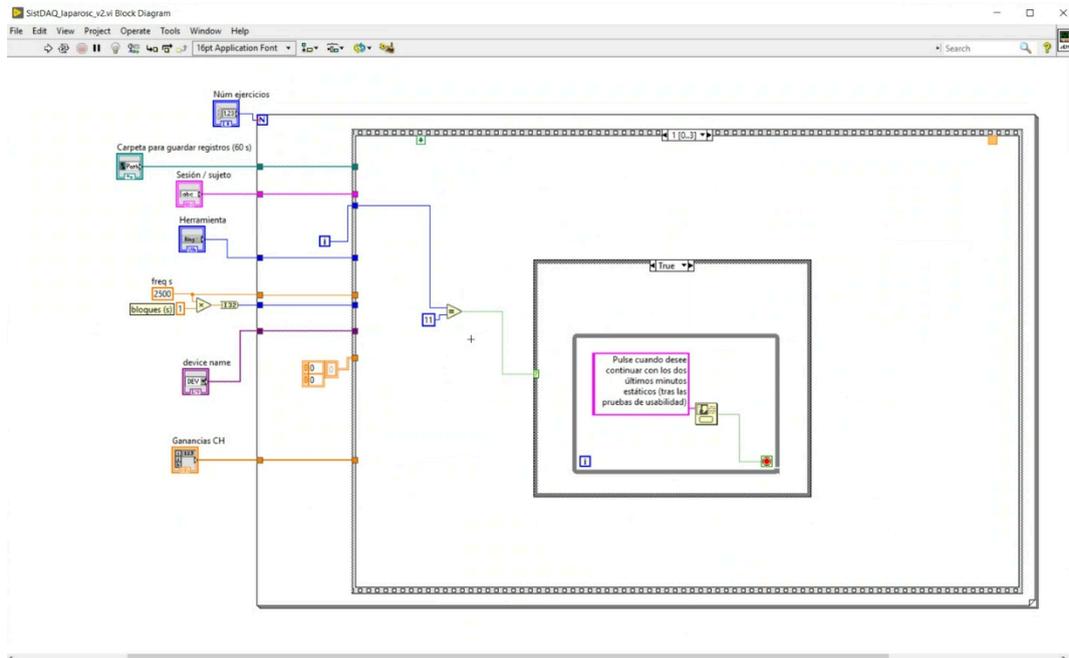


Figura 59. Diagrama de bloques del VI. Mostrándose la secuencia 1. Fuente propia.

La secuencia 2 es la adquisición de las señales.

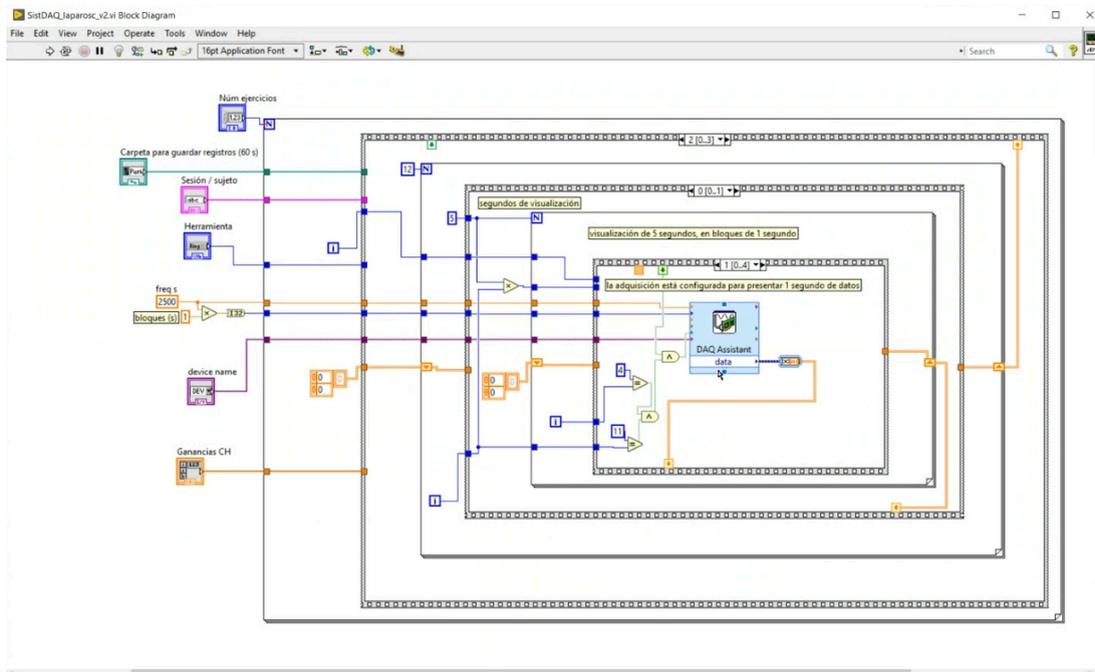


Figura 60. Diagrama de bloques del VI. Mostrándose la secuencia 2. Fuente propia.

Finalmente, la secuencia 3 es la encargada de guardar los datos en los archivos que se han creado en la secuencia 0.

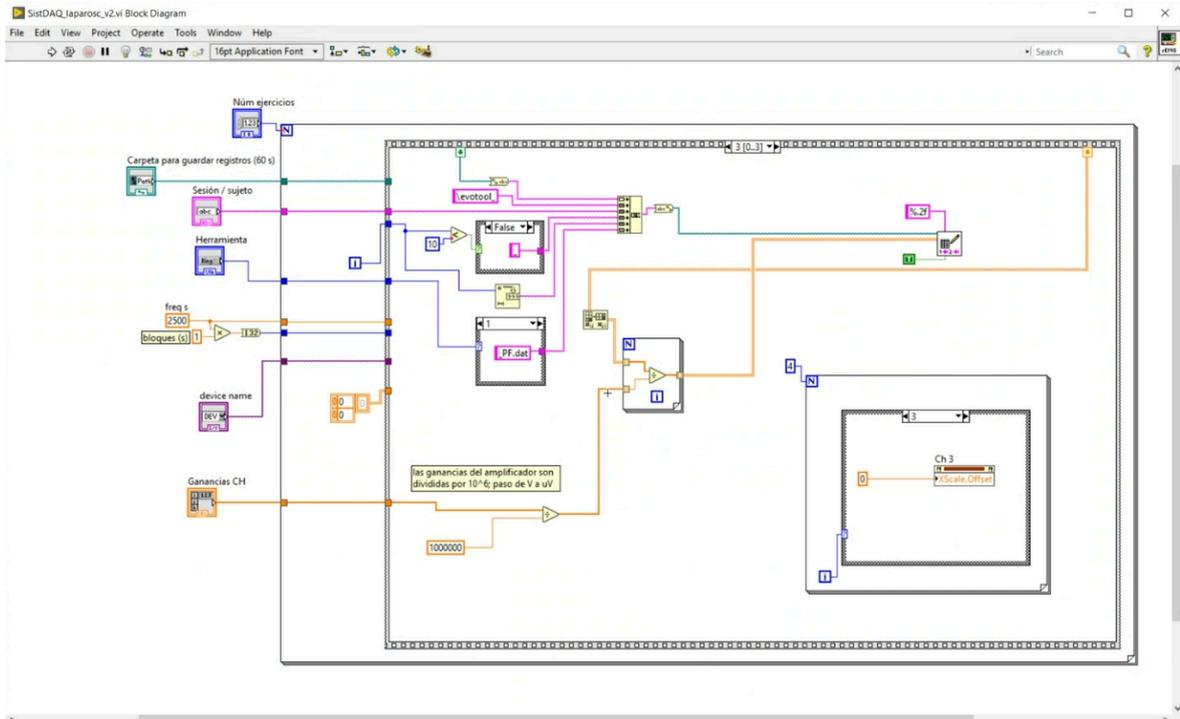


Figura 61. Diagrama de bloques del VI. Mostrándose la secuencia 3. Fuente propia.

3.3 Subsistema *Motion Capture (MoCap)*

Para realizar el estudio ergonómico de las posturas, se ha optado por diseñar un sistema *Mocap* de tipo óptico sin marcadores. A diferencia del sistema líder que utiliza la cámara Kinect de Microsoft, se diseña un sistema que utiliza la inteligencia artificial para detectar las posiciones del sujeto.

La detección de movimiento es posible a la librería *open source MediaPipe* del lenguaje Python. Esta librería cuenta con una solución llamada *Pose* que detecta las posturas del sujeto utilizando la inteligencia artificial. Esto simplifica el proceso de la programación y elimina los marcadores del sistema.

3.3.1 Cámaras

Para detectar las posiciones en 3D, se opta por la utilización de tres cámaras que graban al sujeto desde distintos planos. Se colocan en los planos frontal, lateral y superior al sujeto.

Todas las cámaras deben contar con una resolución mínima de 1920x1080 píxeles, es decir, resolución full HD, para que la solución *MediaPipe Pose* detecte correctamente las posiciones.

Además, el ángulo visión de las cámaras es importante, por ello se ha optado por lo siguiente:

- La cámara frontal: webcam Tyro de la marca Trust con ángulo de visión de 35°.



Figura 62. Trust Tyro Webcam FullHD 1080P. Fuente: PCcomponentes.

- La cámara superior: cámara gran angular del iPhone 13 con un ángulo de visión de 120°.



Figura 63. Cámara iPhone 13. Fuente: Apple Inc.

- La cámara lateral: cámara de tablet Samsung Galaxy Tab S7 con ángulo de la cámara es de 67,7° horizontalmente y de 53,4° verticalmente.



Figura 64. Cámara Samsung Galaxy Tab S7. Fuente: Samsung.

La selección de estas cámaras se ha hecho en base a la disponibilidad y los ángulos de grabación. Se podría haber utilizado otras cámaras o dispositivos que también cumplieran el criterio del ángulo de visibilidad y la resolución. Pero, en este caso, se disponía de este material.

La velocidad de grabación debe ser de 30 fps. Con esa velocidad, los archivos tienen la calidad suficiente para adquirir los datos deseados y no son demasiado grandes. Con esto se disminuye el tiempo de procesamiento y se ahorra memoria de almacenamiento.

Para capturar los datos de movimiento se ha diseñado un sistema de captura de movimiento. El diseño parte de la solución de detección de posturas sin marcadores aportada por *MediaPipe* en lenguaje Python.

Para poder capturar el movimiento del sujeto en 3D, se ha dividido el movimiento en tres planos. Plano superior, plano lateral y plano frontal. Es por esto que se necesitan tres cámaras en la siguiente disposición.

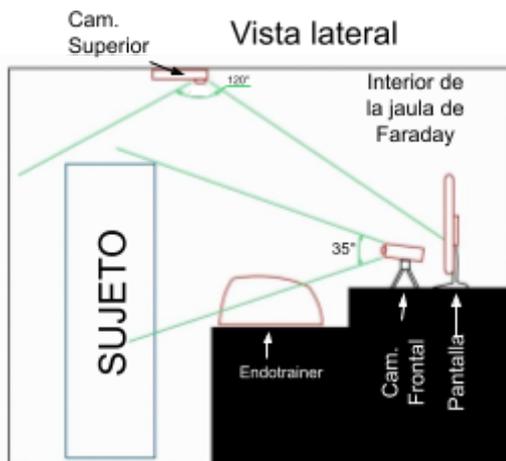


Figura 65. Vista lateral de la disposición de las cámaras.
Fuente propia.

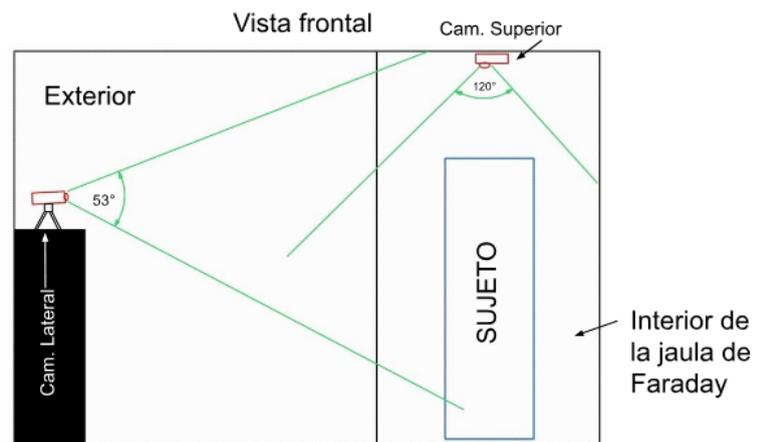


Figura 66. Vista frontal de la disposición de las cámaras.
Fuente propia.

La cámara frontal se sitúa a 120 cm del sujeto y debe estar siempre por encima de su ombligo.

La cámara superior se sitúa en la parte superior de la jaula de Faraday, es decir, a 2 metros de altura.

La cámara lateral se sitúa en un trípode a 135 cm de altura y a una distancia de 2 m del sujeto.

3.3.2 Programa de detección de posturas

El *software* de detección de posturas es capaz de detectar las posturas del sujeto en cualquier plano, gracias a las soluciones y herramientas de la librería *MediaPipe*.

MediaPipe es un conjunto de bibliotecas y herramientas que aplican técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático en las aplicaciones que se desarrollan. Este conjunto proporciona distintas soluciones como pueden ser tareas de visión, texto o audio.

Dentro de las soluciones de visión, se encuentran la solución de detección de puntos de referencia corporales, llamada *MediaPipe Pose*. Esta solución detecta hasta 32 puntos de referencia. Casi todas las articulaciones.



Figura 67. Detección de puntos de referencia de posiciones con *MediaPipe*. Fuente: *Google AI for Developers*

El programa pide al usuario el nombre o identificador de la sesión. Con ello, se crean los códigos de sesión para identificar los datos y se crea el directorio dónde se guardarán los datos y videos grabados durante la sesión. Después se crea un *Data Frame* y tres matrices, de tamaño indefinido, para guardar los datos de las posiciones detectadas: una para datos frontales, otra para datos laterales y una tercera para datos superiores. Y para terminar con la preparación, se crean tres archivos '.mp4', que tienen como nombre la sesión y un identificador de la cámara.

Una vez preparada la adquisición de los datos de movimiento, el programa abre la tres cámara y comprueba que funcionen correctamente. En caso de no funcionar, salta un mensaje de error y se cierra el programa. Si todo funciona correctamente, empieza el bucle de grabación y detección de posturas.

El bucle detecta, frame a frame, las posiciones de los puntos que *MediaPipe* tiene definidos, en concreto los puntos correspondiente a la cadera, hombro, codo, muñeca y puño derechos. Una vez detectadas, el programa guarda esos datos en las matrices. Después, dibuja las líneas que unen los puntos de referencia en los frames y lo guarda en los archivos '.mp4'.

Para terminar la sesión, el usuario debe dar a la tecla 'q'. Se cierran las cámaras y se guardan las matrices en archivos Excel que tienen la forma del *DataFrame* y los vídeos en el directorio de la sesión. Una vez guardado, se cierra el programa.

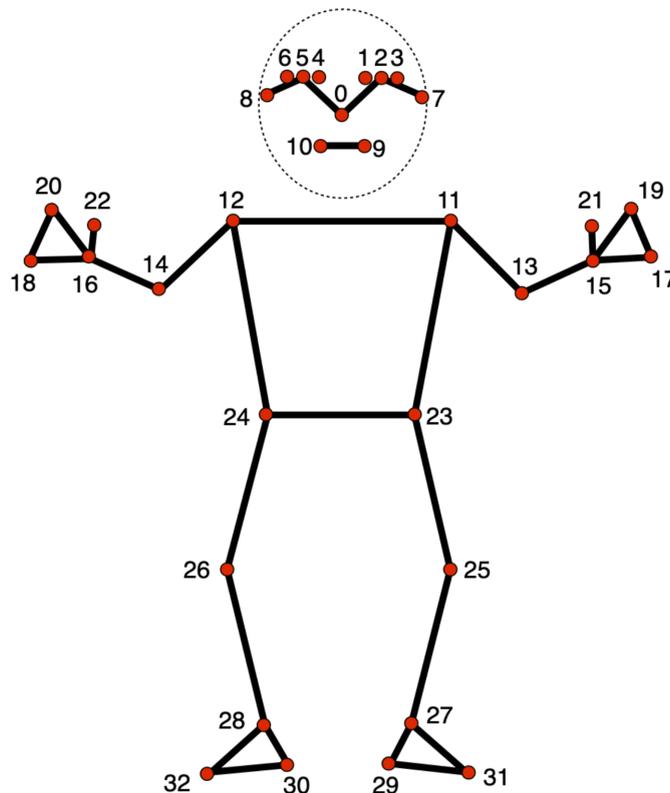


Figura 68. Puntos de referencia que detecta *MediaPipe*. Fuente propia.

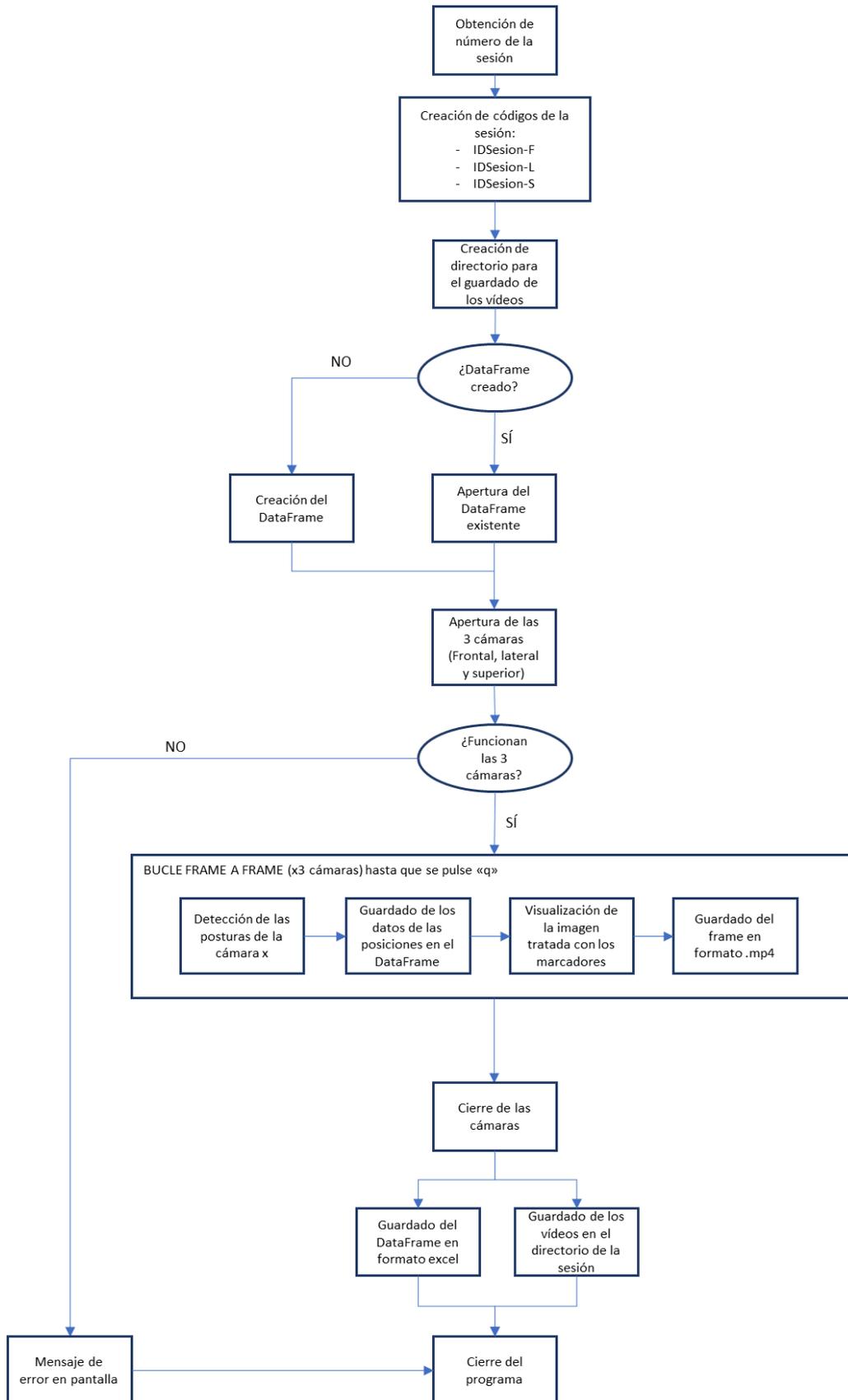


Figura 69. Esquema simplificado de la estructura del programa. Fuente propia

3.3.3 Subsistema de análisis de los datos de movimiento

Los datos por sí solos no aportan información, es necesario tratarlos y analizarlos para entender qué significan. Por ello se diseña un subsistema de análisis de los datos de movimiento.

Este subsistema utiliza los datos obtenidos de la captura de movimiento para obtener una puntuación media de las posturas adoptadas. Esta puntuación, obtenida por la aplicación de los métodos *Rapid Upper Limb Assessment (RULA)* y *Rapid Entire Body Assessment (REBA)*, indica la carga postural del individuo y con ella, el riesgo de padecer una lesión musculoesquelética.

El sistema de análisis se ha desarrollado en Power BI, una herramienta más potente que Excel. A diferencia de Excel, Power BI está diseñado para procesar más rápido y trabajar con grandes volúmenes de datos.

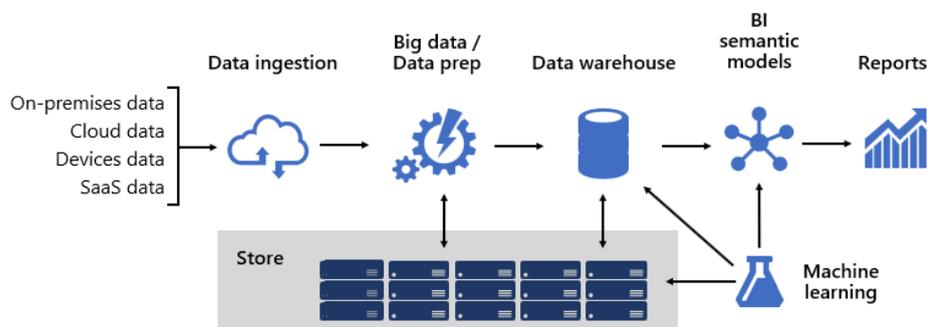


Figura 70. Flujo del tratamiento de datos en Power BI. Fuente: Microsoft Learn

3.3.3.1 Método *Rapid Upper Limb Assessment*

El método *Rapid Upper Limb Assessment* o *RULA* evalúa posturas individuales. Por ello, es necesario seleccionar aquellas posturas que serán evaluadas.

Las mediciones a realizar sobre las posturas son fundamentalmente angulares. Este método debe ser aplicado al lado derecho y al lado izquierdo del cuerpo de forma separada. En este trabajo se escoge evaluar el lado derecho por ser el lado dominante de la mayoría de la población, y ser este mismo el que está sometido a mayor carga postural.

El método *RULA* divide el cuerpo en dos grupos, el grupo A que incluye los miembros superiores (brazos, antebrazos y muñecas) y el grupo B, que comprende las piernas, el tronco y el cuello. Mediante tablas asociadas al método, se asigna una puntuación a cada zona corporal para, en función de dichas puntuaciones, asignar valores globales a cada uno de los grupos A y B. Posteriormente, estas puntuaciones son modificadas en función del tipo de actividad muscular desarrollada y la fuerza aplicada.

Por último, se obtiene la puntuación final, que es directamente proporcional al riesgo que conlleva la tarea: valores altos indican un mayor riesgo de aparición de lesiones musculoesqueléticas. Los niveles

de actuación propuestos van del nivel 1, que estima que la postura evaluada es aceptable, al nivel 4, que indica la necesidad urgente de cambios en la actividad.

La aplicación de este método se puede hacer siguiendo la siguiente hoja de campo:

Método R.U.L.A. Hoja de Campo

A. Análisis de brazo, antebrazo y muñeca

Paso 1: Localizar la posición del brazo

Si el hombro está elevado +1
Si el brazo está aducido (despegado del cuerpo): +1
Si el brazo está apoyado o sostenido: -1

Puntuación brazo

Paso 2: Localizar la posición del antebrazo

Paso 2a: Corregir: +1
Si el brazo cruza la línea media del cuerpo: +1
Si el brazo sale de la línea del cuerpo: -1

Puntuación antebrazo

Paso 3: Localizar la posición de la muñeca

Paso 3a: Corregir: +1
Si la muñeca está sobada por la línea media: +1

Puntuación muñeca

Paso 4: Giro de muñeca

Si la muñeca está en el rango medio de giro: +1
Si la muñeca está girada proximal al rango final de giro: -2

Puntuación giro de muñeca

Paso 5: Localizar puntuación postural en Tabla A

Utilizar valores de pasos 1, 2, 3 y 4 para localizar puntuación postural en Tabla A

Puntuación postural A

Paso 6: Añadir puntuación utilización muscular

Si la postura es principalmente estática (p.e. agarrar superiores a 1 min.) o si sucede repetidamente la acción (4 veces/min. o más): +1

Puntuación muscular

Paso 7: Añadir puntuación de la Fuerza / Carga

Si carga o esfuerzo = 2 Kg. intermitente: +0
Si es de 2 a 10 Kg. intermitente: +1
Si es de 2 a 10 Kg. estática o repetitiva: +2
Si es una carga >10 Kg. o vibrante o súbita: +3

Puntuación fuerza/carga

Paso 8: Localizar total en Tabla C

Ingresar a Tabla C con la suma de los pasos 5, 6 y 7

Puntuación final brazo, antebrazo y brazo

PUNTAJACIÓN

Tabla A

Brazo	1	2	3	4
Antebrazo	1	2	3	4
Mano	1	2	3	4
Giro	1	2	3	4

Tabla B

Grupos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
4	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
5	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
6	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
7	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
8	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
9	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
10	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
11	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21

Tabla C

1	2	3	4	5	6	7
1	1	2	3	4	5	5
2	2	2	3	4	4	5
3	3	3	3	4	4	5
4	3	3	3	4	5	6
5	4	4	4	5	6	7
6	4	4	5	6	6	7
7	5	5	6	6	7	7
8	5	5	6	7	7	7

B. Análisis de cuello, tronco y piernas

Paso 9: Localizar la posición del cuello

Si hay rotación: +1; si hay inclinación lateral: +1

Puntuación cuello

Paso 10: Localizar la posición del tronco

+1 parado

Puntuación tronco

Paso 11: Localizar la posición de las piernas

Si piernas y pies separados y levantados: +1

Puntuación piernas

Paso 12: Localizar puntuación postural en Tabla B

Utilizar valores de pasos 9, 10 y 11 para localizar puntuación postural en Tabla B

Puntuación postural B

Paso 13: Añadir puntuación utilización muscular

Si la postura es principalmente estática (p.e. agarrar superiores a 1 min.) o si sucede repetidamente la acción (4 veces/min. o más): +1

Puntuación uso muscular

Paso 14: Añadir puntuación de la Fuerza / Carga

Si carga o esfuerzo = 2 Kg. intermitente: +0
Si es de 2 a 10 Kg. intermitente: +1
Si es de 2 a 10 Kg. estática o repetitiva: +2
Si es una carga >10 Kg. o vibrante o súbita: +3

Puntuación fuerza/carga

Paso 15: Localizar total en Tabla C

Ingresar a Tabla C con la suma de los pasos 12, 13 y 14

Puntuación final cuello, antebrazo y brazo

PUNTAJACIÓN FINAL: 1 ó 2: Aceptable; 3 ó 4: Ampliar el estudio; 5 ó 6: Ampliar el estudio y modificar pronto; 7: estudiar y modificar inmediatamente

Figura 71. Hoja de campo método RULA. Fuente: Next Prevención

En esta hoja de campo, se definen las puntuaciones de cada miembro en función del ángulo que define con la postura de reposo de referencia. Una vez conseguidas las puntuaciones individuales, se obtiene la puntuación del grupo conjunto, ya sea A o B, mediante la tabla asociada a cada grupo. A continuación, se modifica en función del tipo de actividad y fuerzas realizadas, con las que se obtiene las puntuaciones C y D: Son las puntuaciones A y B modificadas. Y finalmente, con una tabla final, se cruzan los valores C y D para obtener la puntuación final, con el que se obtiene el nivel de actuación.



Figura 72. Esquema de puntuación del método RULA. Fuente: Ergonautas

En esta hoja de campo, se definen las puntuaciones de cada miembro en función del ángulo que define con la postura de reposo de referencia. Una vez conseguidas las puntuaciones individuales, se obtiene la puntuación del grupo conjunto, ya sea A o B, mediante la tabla asociada a cada grupo. A continuación, se modifica en función de las fuerzas realizadas, con las que se obtiene la puntuación C. Y finalmente, esta puntuación se modifica en función del tipo de actividad que se realiza y se obtiene la puntuación final y el obtiene el nivel de actuación.

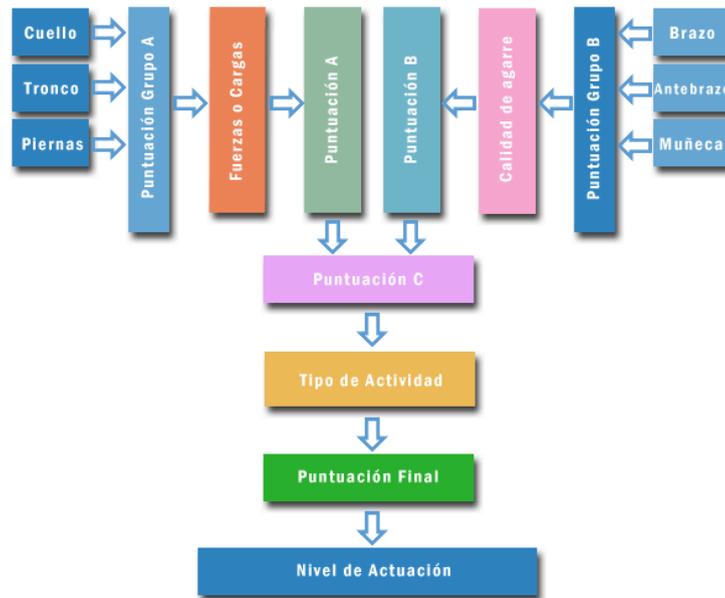


Figura 74. Esquema de puntuación del método *REBA*. Fuente: Ergonautas

Puntuación	Nivel	Riesgo	Actuación
1	0	Inapreciable	No es necesaria actuación
2 o 3	1	Bajo	Puede ser necesaria la actuación.
4 a 7	2	Medio	Es necesaria la actuación.
8 a 10	3	Alto	Es necesaria la actuación cuanto antes.
11 a 15	4	Muy alto	Es necesaria la actuación de inmediato.

Tabla 9. Niveles de actuación según la puntuación final obtenida mediante el método *REBA*. Fuente: Ergonautas

3.4 Cuestionario subjetivo *User Experience*

Los cuestionarios subjetivos pretenden obtener la información subjetiva del usuario sobre un producto para después realizar las modificaciones sobre el prototipo que se evalúa. Es por ello que se ha diseñado un cuestionario para conocer la opinión de los usuarios sobre los mangos de las herramientas y conocer la carga mental percibida durante el protocolo definido.

El cuestionario se ha diseñado siguiendo el método *NASA TLX* adaptado al protocolo diseñado. Este método subjetivo propone un procedimiento de valoración de la carga mental desde una perspectiva multidimensional, y que otorga una puntuación global de la carga de trabajo a partir de la media ponderada de las puntuaciones de las seis subescalas siguientes:

- **Demanda mental:** Esfuerzo mental que requiere la tarea
- **Demanda física:** Esfuerzo físico que requiere la tarea
- **Tiempo de esfuerzo:** Percepción del usuario sobre la duración de la tarea.
- **Rendimiento:** Percepción del usuario sobre su propio rendimiento en la tarea.
- **Esfuerzo:** Esfuerzo general que requiere la tarea.
- **Nivel de frustración:** Nivel de frustración del usuario durante la tarea.

Las preguntas deben estar formuladas de forma que se contesten con una escala del 1 al 20, siendo el 1 un extremo, como puede ser «Nada de acuerdo» y el 20 el otro extremo: «Completamente de acuerdo».

- **Demanda mental**

En este apartado se pretende medir la demanda mental que requiere el uso de la herramienta en función de su intuitividad y la dificultad de cada ejercicio.

- **Demanda física**

Esta subescala es la que mayor cantidad de preguntas presenta. Porque el interés del estudio ergonómico es conocer si los sujetos han sufrido de algún tipo de dolor o entumecimiento en las zonas con mayor probabilidad de sufrir un TME: cuello, hombros, mano, muñeca, espalda y pierna.

Se pregunta la frecuencia e intensidad con la que se ha sentido el dolor o el entumecimiento en cada zona durante y después del protocolo. También se quiere conocer el esfuerzo físico que supone cada ejercicio.

Para saber las causas de los dolores y el esfuerzo físico, también se quiere conocer la adaptación de la herramienta con la mano y la incomodidad de las posturas que ha tenido que adoptar durante cada ejercicio.

- **Esfuerzo y tiempo de esfuerzo**

En este apartado se pretende conocer la percepción del tiempo que ha dedicado el sujeto a cada ejercicio. Si el sujeto percibe que ha estado poco tiempo realizando el ejercicio, es porque el ejercicio y la maniobrabilidad de la herramienta le han parecido complejos; necesitando más tiempo para

completar la tarea. En cambio, si el sujeto ha percibido que ha estado mucho tiempo, denota lo contrario porque se ha aburrido.

- **Rendimiento**

Conocer el rendimiento de la herramienta evaluada permite saber si hay que realizar cambios en su funcionamiento o solo en su ergonomía. Para ello se pregunta por la precisión y la cantidad de fuerza transmitida a la punta desde el mango.

- **Nivel de frustración**

El nivel de frustración puede ser un indicador de la habilidad del sujeto, pero también de la adaptabilidad de la herramienta. Por ello, se pregunta el nivel de frustración que ha sentido el sujeto en cada ejercicio y las ganas de renunciar.

Finalmente e independiente al método *NASA TLX*, el sujeto tiene la oportunidad de dar su opinión sobre la herramienta utilizada, comentando los aspectos que más y que menos le han gustado en una última pregunta.

5. RESULTADOS

5.1 Zona de trabajo

El primer resultado obtenido en este trabajo, es el entorno de entrenamiento situado dentro de la jaula de Faraday. En él se coloca el *endotrainer* a una altura adaptable a la altura del sujeto. Enfrente, se encuentra el amplificador y la tarjeta de adquisición de datos. Encima del amplificador se sitúan la cámara frontal y el ordenador portátil 1. Se encarga de mostrar en pantalla y grabar el interior del modelo de simulación. En cambio, la cámara superior, se encuentra sujeta por unos alambres que la abrazan en lo alto de la jaula de Faraday. Con esto dentro, el sujeto dispone de un metro cuadrado en la zona de los pies, pero prácticamente total libertad de movimiento del tren superior si la puerta de la jaula se encuentra abierta.

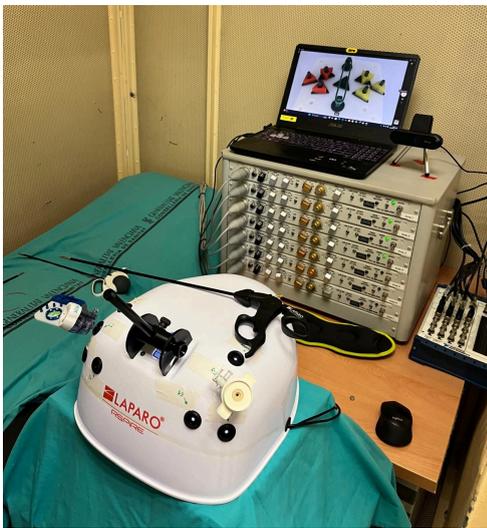


Figura 75. Disposición del entorno de entrenamiento.
Fuente propia.



Figura 76. Posición del sujeto en la zona de trabajo visto desde el lado derecho. Fuente propia.

Otro de los resultados es la sujeción de los cables del registro de señales al sujeto. Con motivo de minimizar el movimiento de artefacto los cables de los canales 1 a 4 se encuentran sujetos a la jaula y al cinturón del sujeto. Desde la cintura salen los cables de los electrodos y van por debajo de la ropa.



Figura 77. Sujeción de los cables de registro muscular. Fuente propia.

5.2 Señales EMGs registradas

El siguiente resultado son las señales EMGs registradas durante el protocolo de ejercicios. A partir de los datos de las señales se han representado, para cada ejercicio y cada músculo, en Matlab la señal original y su RMS tomando ventanas de medio segundo. Además, se ha calculado el valor medio del RMS, la integral de la señal, la frecuencia media y la frecuencia mediana de la señal. A continuación se explica el por qué de estos indicadores.

- **Gráfica RMS:** El RMS es un indicador en valor eficaz de la intensidad muscular a lo largo del tiempo. A diferencia de la señal original, el RMS ofrece una vista más sencilla de interpretar.
- **Valor medio del RMS:** El valor medio del RMS indica la intensidad media en la que ha trabajado el músculo durante todo el periodo de tiempo. Es útil para poder comparar la fatiga del mismo músculo en otras circunstancias, como es el cambio de herramienta para el mismo ejercicio.
- **Integral de la señal:** La integral de la señal es un indicador del trabajo que ha realizado el músculo. Con ella es sencillo comparar entre músculos y conocer cuál es el que más ha trabajado durante los ejercicios, e incluso poder comprar el trabajo del mismo músculo para distintas situaciones y ejercicios.

A continuación, se comentan las señales obtenidas de los cuatro músculos durante el primer ejercicio estático (marcar la postura de entrada) utilizando una herramienta con un diseño A y otra herramienta con un diseño B.

- **Músculo braquiorradial**

En los siguientes resultados, se observa como para la herramienta A el músculo braquiorradial trabaja más a lo largo del tiempo y con una 70% mayor de intensidad necesaria que la herramienta B.



Figura 78. Señal del braquiorradial en el primer ejercicio estático. Herramienta A. Fuente propia

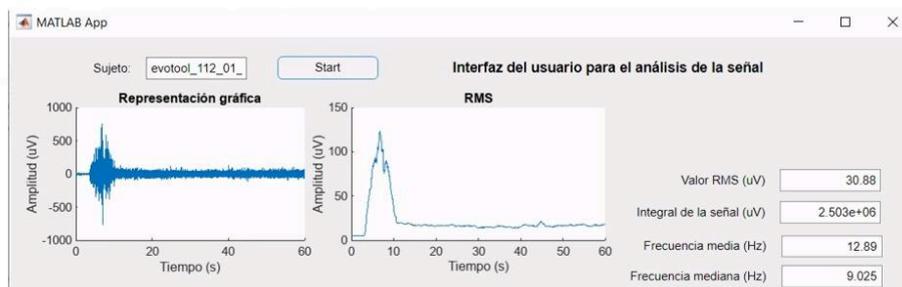


Figura 79. Señal del braquiorradial en el primer ejercicio estático. Herramienta B. Fuente propia

- **Músculo bíceps**

El músculo bíceps realiza un esfuerzo similar en ambas herramientas para el mismo ejercicio estático.



Figura 80. Señal del bíceps en el primer ejercicio estático. Herramienta A. Fuente propia

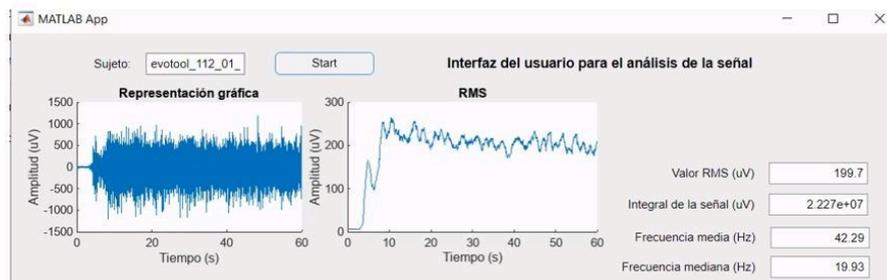


Figura 81. Señal del bíceps en el primer ejercicio estático. Herramienta B. Fuente propia

- **Músculo deltoides**

En este caso, el deltoides sufre mayor fatiga y necesita trabajar un 40% más para mantener la postura usando la herramienta A.

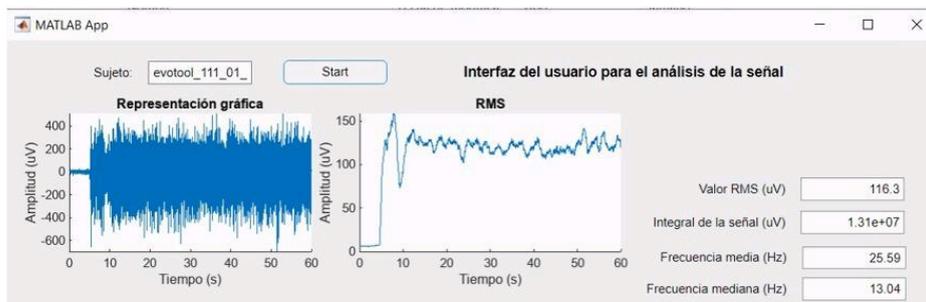


Figura 82. Señal del deltoides en el primer ejercicio estático. Herramienta A. Fuente propia

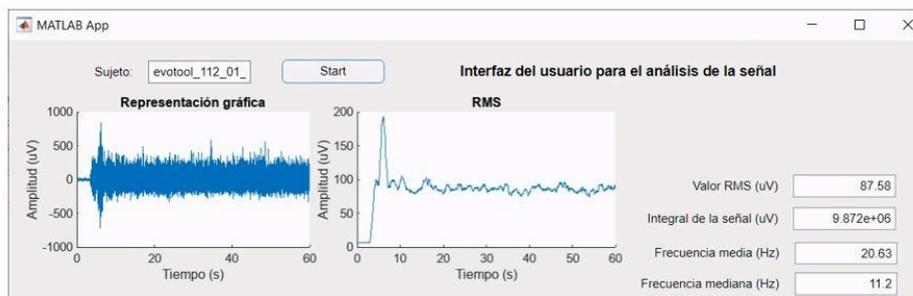


Figura 83. Señal del deltoides en el primer ejercicio estático. Herramienta B. Fuente propia

- **Músculo trapecio**

Finalmente, el trapecio es el segundo que más sufre de los cuatro, por debajo del bíceps y por encima del deltoides. Se observa como para la herramienta A, se necesita mayor amplitud, un 45% más de intensidad que en la herramienta B, derivando en mayor trabajo, durante todo el ejercicio.



Figura 84. Señal del trapecio en el primer ejercicio estático. Herramienta A. Fuente propia

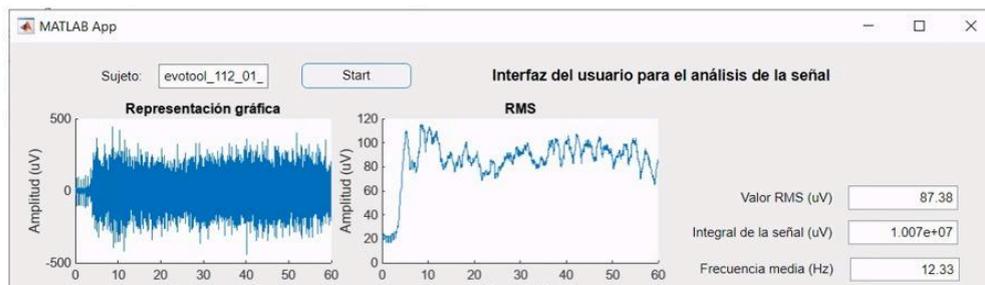


Figura 85. Señal del trapecio en el primer ejercicio estático. Herramienta B. Fuente propia

Se concluye que la herramienta A provoca mayor fatiga muscular que la herramienta B.

5.3 Datos de movimiento

Los datos obtenidos por el programa Python son:

- La posición absoluta (x,y) de cada articulación de interés: muñeca, codo, hombro y cadera.
- Los ángulos relativos de las extremidades.
- La herramienta utilizada: A o B.
- El plano sobre el que se ha trabajado: frontal o lateral.
- El frame del que se ha obtenido la información.
- El tiempo en milisegundos al que pertenece el frame de los datos obtenidos.

Estos datos se guardan en formato excel y tienen la siguiente forma:

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA EVALUACIÓN ERGONÓMICA DE HERRAMIENTAS DE LAPAROSCOPIA BASADO EN LA CAPTACIÓN DE MOVIMIENTO Y SEÑALES ELECTROMIOGRÁFICAS

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
ID Sesión	Tool	Plano	Frame	Tiempo	ht_Soulder	ht_Shoulder	ht_Elbow	ht_Wrist	ht_Wrist	ht_Right Hip	ht_Right Hip	ht_Right Fist	ht_Right Fist	ngulo hombro	ngulo codo	ngulo mano	
S01Juanjo B	L		1	33,33333	673	402	701	529	812	475	690	609	844	471	4,729837	22,90373	66,47435
S01Juanjo B	L		2	66,66667	674	402	704	528	814	475	695	614	846	471	5,338083	23,15291	66,00255
S01Juanjo B	L		3	100	677	403	708	527	816	475	700	616	847	472	5,755561	23,23523	64,72609
S01Juanjo B	L		4	133,3333	677	404	709	527	817	475	700	617	848	472	6,039023	23,00534	64,72609
S01Juanjo B	L		5	166,6667	678	403	709	527	817	475	701	618	848	473	5,831537	23,23523	62,88994
S01Juanjo B	L		6	200	678	403	709	527	817	475	701	618	848	474	5,831537	23,23523	61,04616
S01Juanjo B	L		7	233,3333	677	403	708	527	817	475	701	617	848	475	5,793723	23,17935	59,19855
S01Juanjo B	L		8	266,6667	675	403	707	527	817	476	701	617	848	475	5,965715	23,54972	60,55457
S01Juanjo B	L		9	300	675	403	706	527	816	476	701	617	848	476	5,793723	23,54972	57,89374
S01Juanjo B	L		10	333,3333	675	403	705	528	815	477	700	618	847	476	5,552261	23,77807	59,68365
S01Juanjo B	L		11	366,6667	676	403	705	528	813	478	701	617	847	476	5,344181	24,3306	59,15076
S01Juanjo B	L		12	400	676	403	705	528	813	478	701	617	846	477	5,344181	24,3306	58,31089
S01Juanjo B	L		13	433,3333	677	403	705	528	812	479	702	618	845	477	5,205822	24,83135	59,50917
S01Juanjo B	L		14	466,6667	677	404	705	528	812	479	705	618	845	477	5,270057	24,60386	59,50917
S01Juanjo B	L		15	500	677	403	702	529	812	480	706	618	845	477	4,589943	24,86773	61,23537
S01Juanjo B	L		16	533,3333	677	403	701	529	811	480	706	619	844	477	4,444106	24,86773	61,23537
S01Juanjo B	L		17	566,6667	678	403	701	529	811	480	706	620	844	477	4,294622	24,86773	61,23537
S01Juanjo B	L		18	600	680	403	701	529	811	480	707	620	844	477	3,934782	24,86773	61,23537
S01Juanjo B	L		19	633,3333	680	403	701	529	811	480	706	622	844	478	3,984953	24,86773	59,50917
S01Juanjo B	L		20	666,6667	680	403	701	529	811	480	705	622	844	478	3,984953	24,86773	59,50917
S01Juanjo B	L		21	700	680	403	701	529	811	480	705	623	843	478	4,0097	24,86773	60,42934

Figura 86. Resultados del método RULA para la herramienta A. Fuente propia

5.3.1 Marcadores de posturas



Figura 87. Detección de postura en el plano lateral. Fuente propia

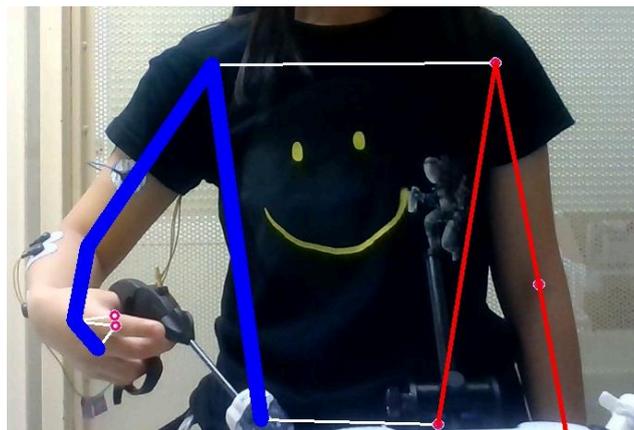


Figura 88. Detección de postura en el plano frontal. Fuente propia

5.4 Método RULA



Figura 89. Resultados del método RULA para la herramienta A. Fuente propia



Figura 90. Resultados del método RULA para la herramienta B. Fuente propia

Durante la aplicación del método RULA no se han podido tener en cuenta todos los factores que este evalúa, como lo son el tipo de actividad y el peso de las cargas. Por ello, los resultados obtenidos son tan bajos. Pese a ello, la información obtenida de estos resultados es que la herramienta B es más ergonómica y conlleva menor riesgo para el sujeto que la herramienta A.

5.5 Método REBA



Figura 91. Resultados del método REBA para la herramienta A. Fuente propia



Figura 92. Resultados del método REBA para la herramienta B. Fuente propia

Al igual que en el método RULA, en la aplicación del método REBA no se han podido tener en cuenta los factores del peso de la carga y del tipo de agarre de la carga. Por ello, los resultados son más bajos de lo habitual. A diferencia del método RULA, los resultados de este método son similares. Esto es debido al carácter del propio método, que es más válido cuando se evalúan posturas de forma conjunta, que de manera individual.

5.6 Cuestionario subjetivo

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del cuestionario de experiencia del usuario.

5.6.1 Resultados de demanda mental

En la demanda mental se ha evaluado la percepción de la dificultad de cada ejercicio y la intuitividad de cada herramienta.

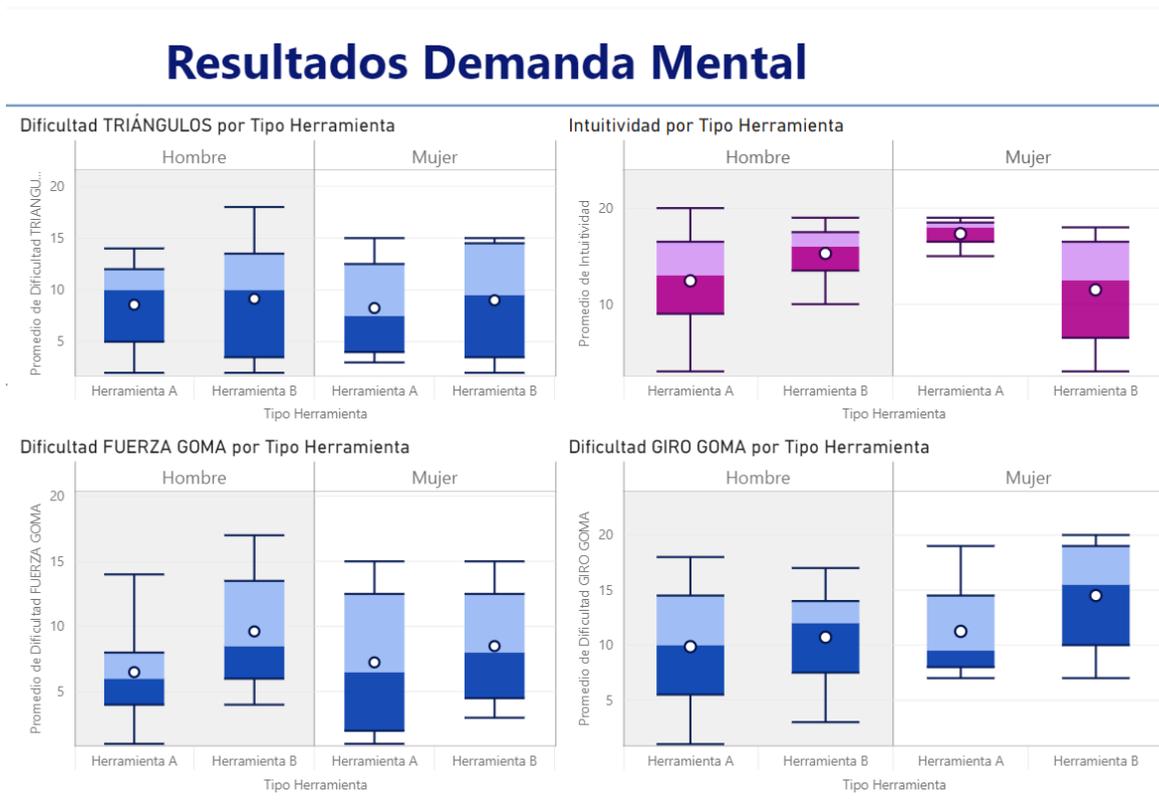


Figura 93. Resultados de la demanda mental de ambas herramientas. Fuente propia

En cuanto a la dificultad de ejecución de los ejercicios e independientemente de la dificultad individual de cada ejercicio, la percepción general es que es más difícil realizarlos con la herramienta B.

Sin embargo, en la intuitividad hay discordancias. Los hombres han considerado que la herramienta B era la más intuitiva y las mujeres han considerado que era más intuitiva la herramienta A.

5.6.2 Resultados de demanda física durante los ejercicios

Durante los ejercicios se ha optado por conocer la frecuencia e intensidad de dolor y entumecimiento de los participantes. Los resultados muestran que los síntomas de dolor y entumecimiento aparecen con la misma frecuencia en ambas herramientas, pero las intensidades son mayores en la herramienta A.

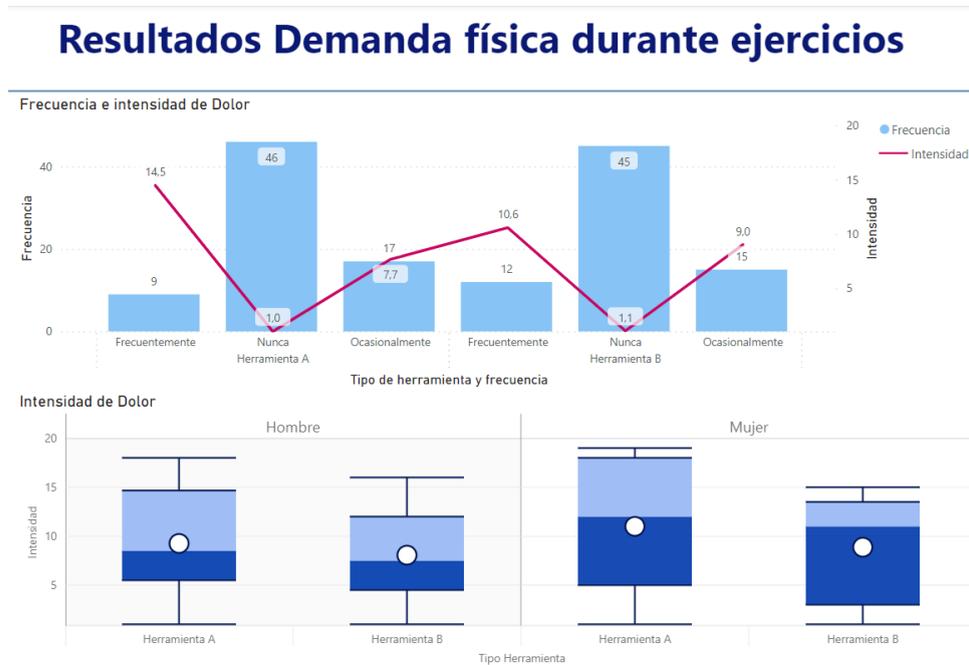


Figura 94. Resultados de la demanda física durante los ejercicios. Dolor. Fuente propia

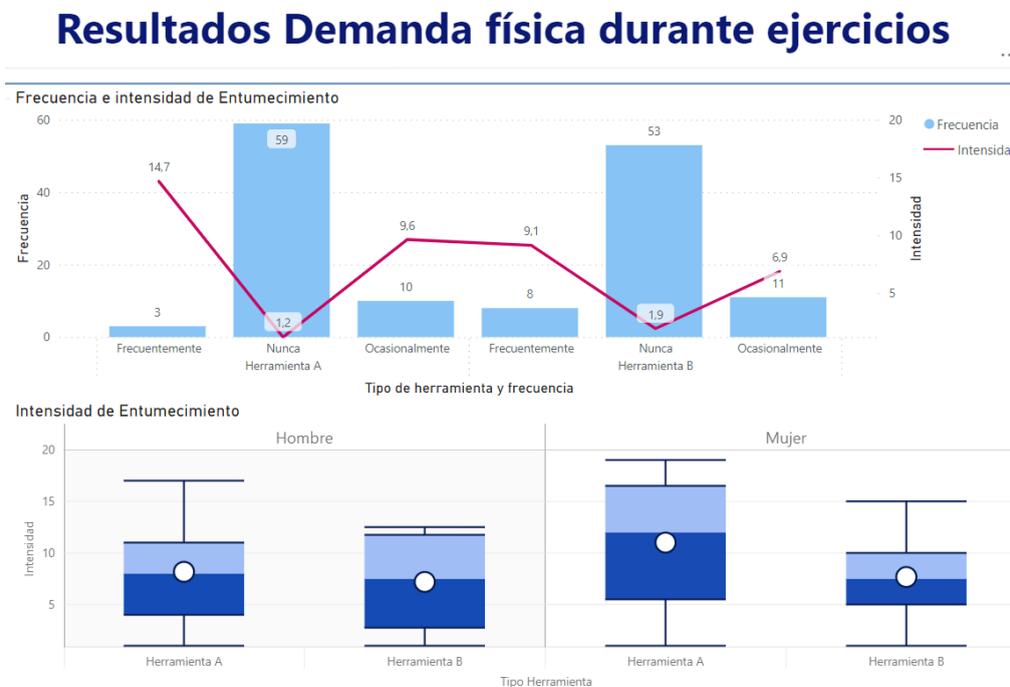


Figura 95. Resultados de la demanda física durante los ejercicios. Entumecimiento. Fuente propia

5.6.3 Resultados de demanda física después de los ejercicios

Como en los resultados de dolor durante los ejercicios, las intensidades han sido mayores en la herramienta A.

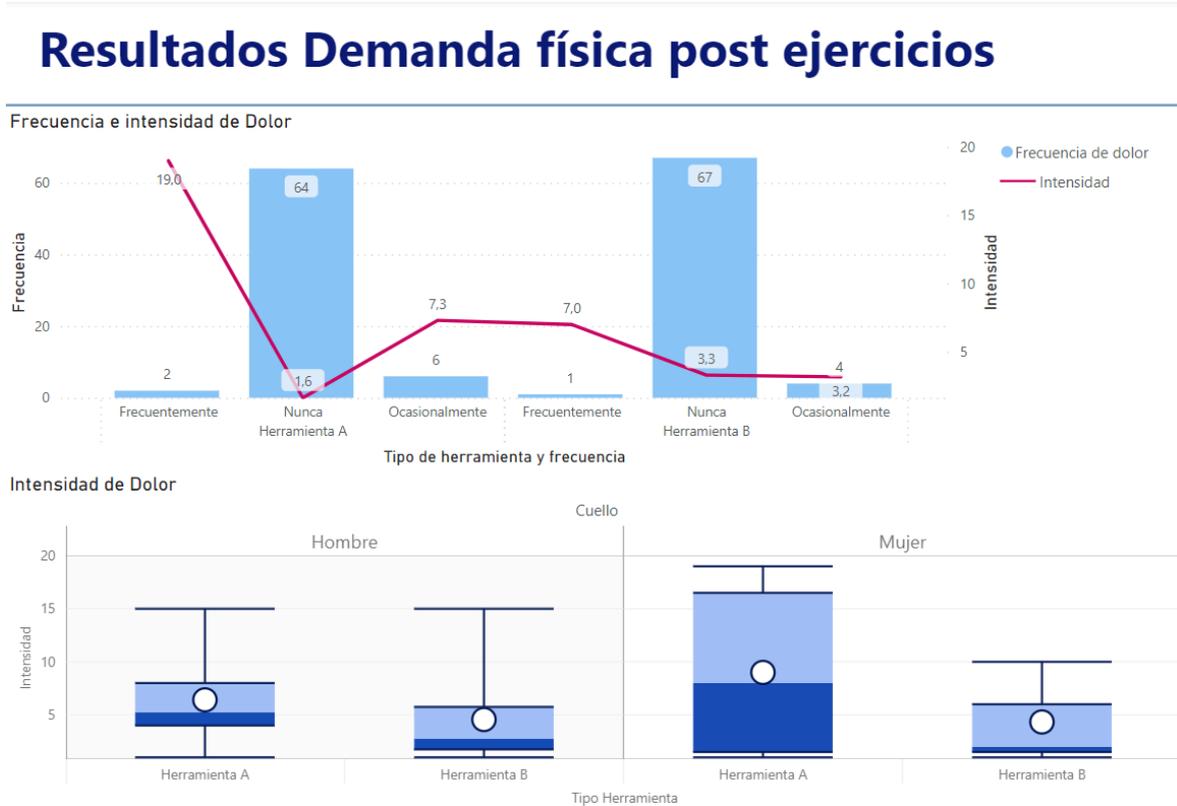


Figura 96. Resultados de la demanda física después de los ejercicios. Fuente propia

Después de los ejercicios, las zonas dónde los sujetos han sufrido algún tipo de dolor son en la mano y en la muñeca. Con intensidades comprendidas en el rango de 5 a 15, resultando siempre mayores las intensidades por el uso de la herramienta A.

5.6.4 Resultados de demanda física: comodidad y adaptabilidad

La adaptabilidad a la mano es crucial para que los sujetos se sientan cómodos y seguros utilizando las herramientas y noten menor cansancio psicológico al utilizarlas.

Resultados Demanda física comodidad y adaptabilidad

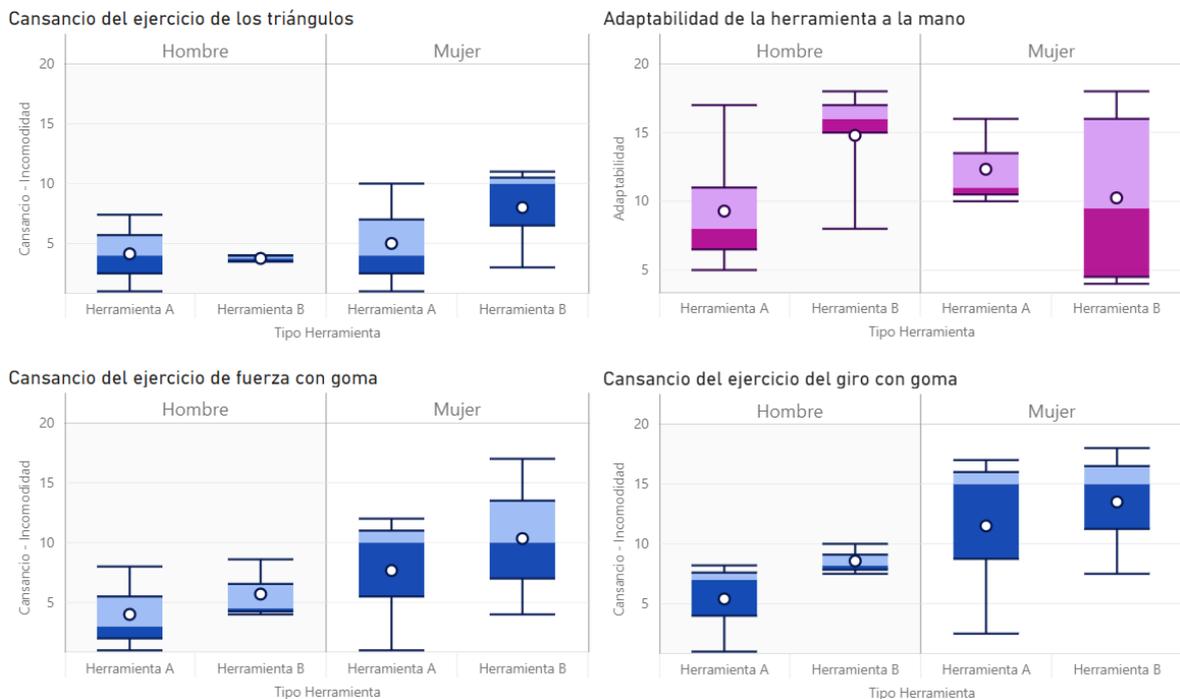


Figura 97. Resultados de comodidad y adaptabilidad. Cansancio. Fuente propia

El cansancio no es solo muscular, muchas veces es también mental. En este caso se puede observar que en los tres ejercicios dinámicos, tanto hombres como mujeres, consideran que se sienten más cansados al utilizar la herramienta B. Sin embargo, en el análisis de las señales se puede observar que la fatiga muscular es mayor cuando se utiliza la herramienta A. Esto es debido a la adaptabilidad de la herramienta. El diseño de la segunda herramienta le parece más adaptable a su mano al público masculino, cosa que no ocurre con el público femenino.

La adaptabilidad de la herramienta influye directamente en la comodidad. Esto se ve reflejado en la siguiente imagen, donde el sector femenino encuentra más incómoda la herramienta B respecto a la herramienta A. En cambio, el sector masculino, que siente mayor adaptación de la herramienta A, se siente también más cómodo con esa herramienta.

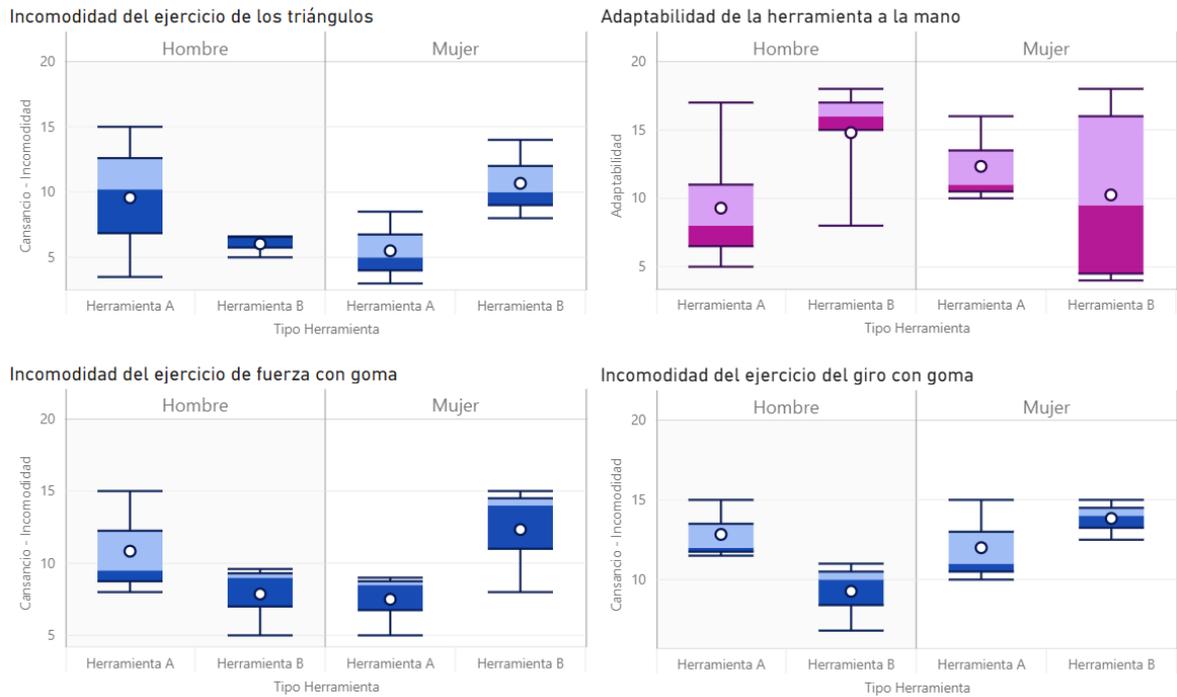


Figura 98. Resultados de comodidad y adaptabilidad. Incomodidad. Fuente propia

5.6.4 Resultados de rendimiento

Resultados Rendimiento

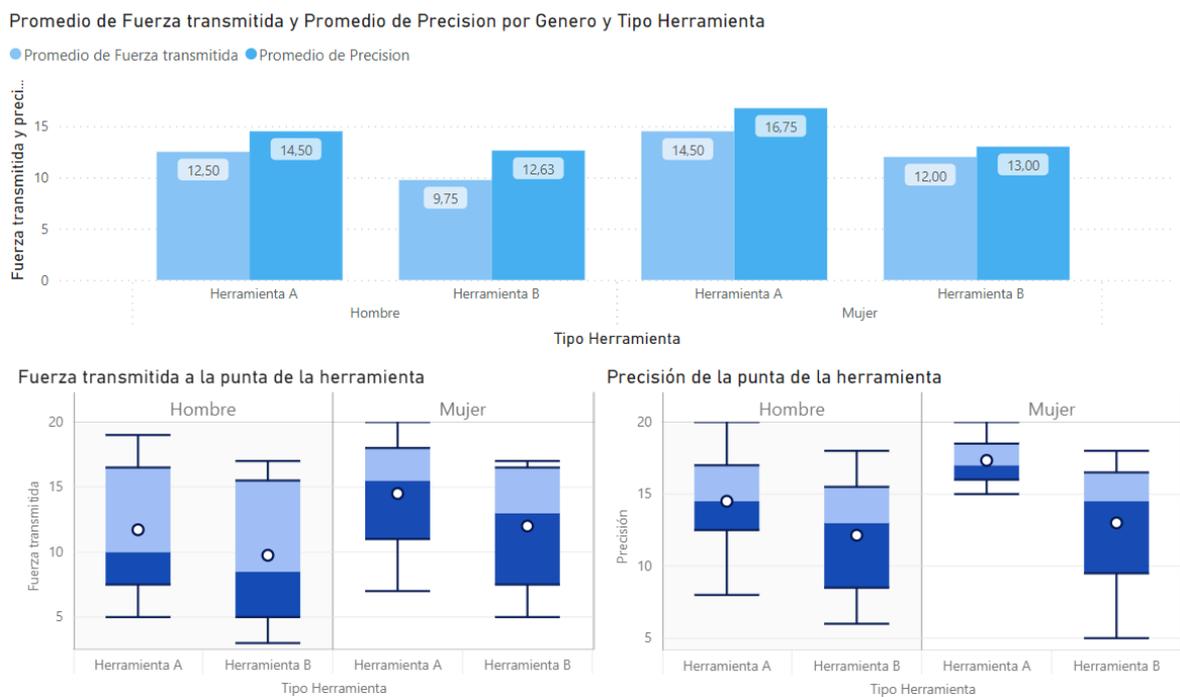


Figura 99. Resultados de rendimiento. Fuente propia

El rendimiento se ha evaluado teniendo en cuenta la fuerza aplicada sobre la herramienta y la transmitida a la punta de la misma, además de la precisión mostrada durante los ejercicios.

Se observa que la herramienta A es más precisa y ofrece mejor transmisión de la fuerza, por tanto, se puede decir que tiene un mayor rendimiento que la herramienta B.

5.6.5 Resultados de frustración y tiempo de esfuerzo

La intención de renuncia ha resultado similar en ambas herramientas para los tres ejercicios, en cambio la frustración ha sido variable. Según el tipo de ejercicio se puede saber el porqué de esa varianza.

En el caso del ejercicio de trasladar los triángulos, dónde se premia la comodidad y adaptabilidad de la herramienta, pues no se necesita aplicar mucha fuerza ni gran precisión, se observa como el grupo de mujeres ha presentado mayor frustración con la herramienta B, mientras que el grupo de hombres ha sufrido utilizando la herramienta A.

Resultados frustración y tiempo de esfuerzo

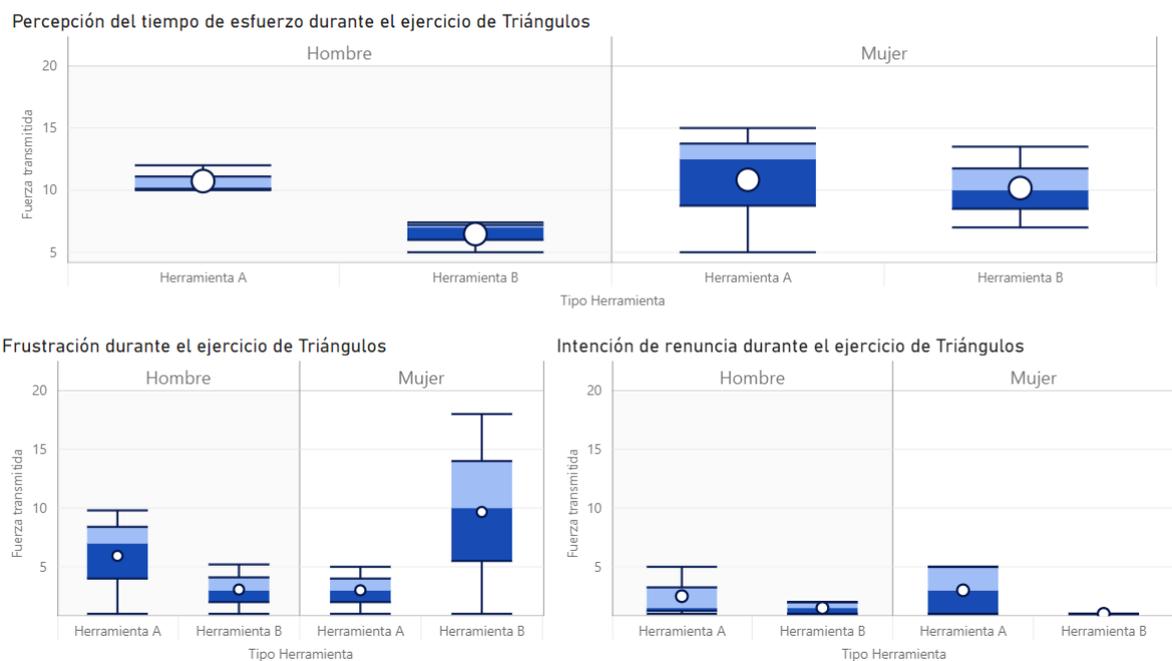


Figura 100. Resultados de frustración y percepción del tiempo de esfuerzo durante el ejercicio de los Triángulos. Fuente propia

Durante el ejercicio de fuerza con la goma, se está poniendo a prueba la transmisión de la fuerza de la herramienta. Por ellos, se ve claramente como aumenta la frustración al usar la herramienta B en ese ejercicio. Sin embargo, la intención de renunciar sigue siendo baja en ambas herramientas.

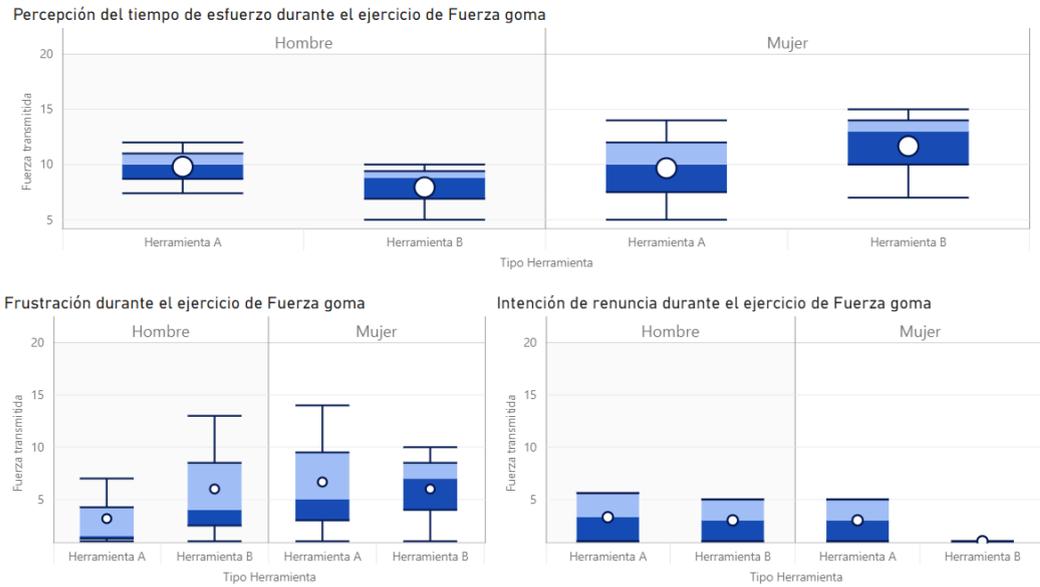


Figura 101. Resultados de frustración y percepción del tiempo de esfuerzo durante el ejercicio de Fuerza con Goma.
Fuente propia

Finalmente, en el ejercicio del giro de la goma, es una mezcla entre comodidad y fuerza transmitida a la punta de la herramienta. Es por esto que los hombres han sentido menor frustración al utilizar la herramienta B que las mujeres.

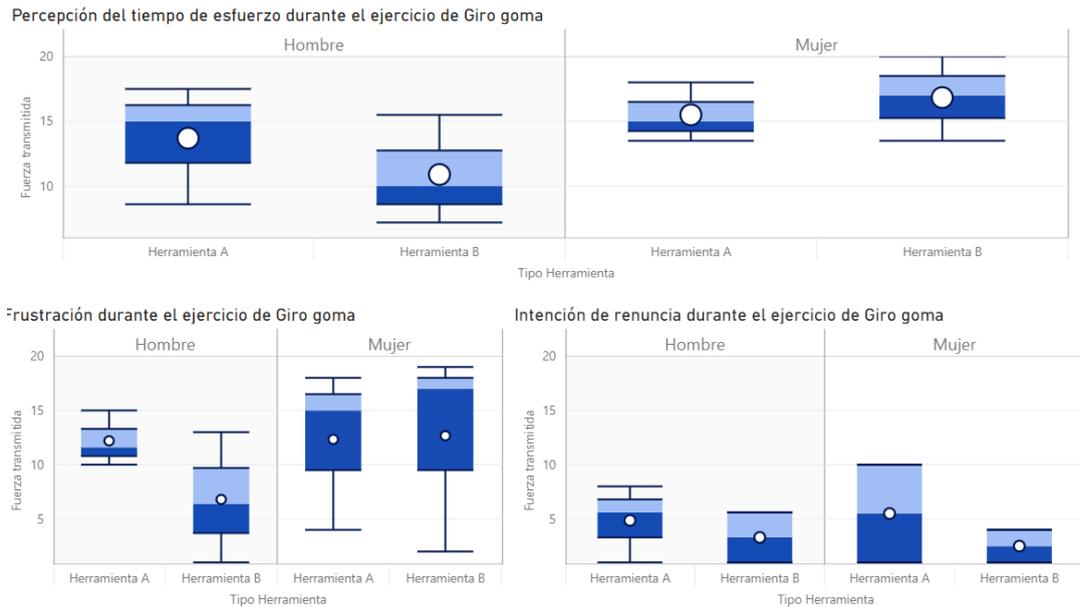


Figura 102. Resultados de frustración y percepción del tiempo de esfuerzo durante el ejercicio de Giro con Goma.
Fuente propia

6. CONCLUSIONES

En primer lugar, se ha diseñado un protocolo de ejercicios compuesto por dos ejercicios estáticos y tres dinámicos, haciéndolo un recorrido completo y sencillo de realizar. Del que se ha extraído la información muscular y de movimiento. Además, se trata de un conjunto de ejercicios que ha sido diseñado teniendo de referencia los entrenamientos de los cirujanos, por lo que además puede valer de entrenamiento.

En segundo lugar, el sistema de adquisición de las señales de los cuatro músculos de interés y el instrumento virtual han funcionado correctamente, capturando datos válidos de las señales EMGs de los participantes.

Siguiendo con el sistema de captación de movimiento, el sistema desarrollado funciona pero tiene margen de mejora. Se ha desarrollado un entorno físico dónde poder captar correctamente el movimiento de los participantes gracias a tres cámaras, y un entorno *software*, basado en *MediaPipe Pose*, capaz de adquirir esos movimientos usando la inteligencia artificial y de referencia las articulaciones de interés. También, para un futuro trabajo, sería interesante desarrollar la visualización de la trayectoria de los movimientos, así como añadir una interfaz más amigable del *software*.

En cuanto al diseño del cálculo y la visualización de los resultados *RULA* y *REBA*, se ha desarrollado un reporte en Power BI que calcula automáticamente los resultados y ofrece una visualización sencilla y desglosada por ejercicios de los resultados ergonómicos, con el fin de detectar qué ejercicios son los más perjudiciales.

Además, se ha diseñado un cuestionario de *user experience* o *UX* siguiendo las directrices de la NASA-TLX, junto con personalización para obtener más información.

Finalmente, el sistema completo consta de un protocolo de ejercicios del que se adquieren cuatro señales musculares por un sistema de adquisición de señales y el movimiento 3D del sujeto mediante tres cámaras y un *software* diseñado en lenguaje *Python* utilizando la inteligencia artificial del módulo *MediaPipe*. Posteriormente, las señales musculares se tratan con un instrumento virtual diseñado en *LabView* y los datos del movimiento se evalúan, utilizando los métodos *RULA* y *REBA*, con Power BI. Por otro lado, los participantes dejan sus opiniones y sensaciones de la herramienta utilizada a través del cuestionario de experiencia del usuario. Estos datos también se analizan y visualizan con Power BI.

7. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Rodríguez PCA, Vázquez OR. El inicio de la laparotomía en el trauma abdominal en México. *Cir Gen.* 2001;23(4):278-282.
- [2] Ramírez, L. (2018, August 8). *Postquirúrgico de laparatomía exploratoria - RELAC SIS*. Pan American Health Organization (PAHO). Retrieved June 10, 2024, from <https://www3.paho.org/relacsis/index.php/es/foros-relacsis/foro-becker-fci-oms/61-foros/consultas-becker/951-postquirurgico-de-laparatomia-exploratoria/>
- [3] Asociación Española de Cirujanos. (n.d.). *Consentimiento informado para laparotomía exploradora*. Asociación Española de Cirujanos. Retrieved June 10, 2024, from https://www.aecirujanos.es/files/portalcontenidos/118/documentos/9_8.pdf
- [4] Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Lima). Facultad de Medicina. Escuela Académico Profesional de Medicina Humana. Departamento Académico de Cirugía & Salaverry García, O. (1999). *Cirugía I: Cirugía General*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Lima). Facultad de Medicina. Escuela Académico Profesional de Medicina Humana. Departamento Académico de Cirugía. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/libros/medicina/cirugia/ficha_t1.htm
- [5] Delgado Gomis, F., Blanes Masson, F., Gómez Abril, S., Richart Aznar, J., & Trullenque Juan, R. (2001, Marzo). Complicaciones de la cirugía laparoscópica. *Cirugía Española, Vol. 69* (Núm. 3), 330-336.
- [6] Pérez-Duarte, F. J., Sánchez-Margallo, F. M., Díaz-Güemes Martín-Portugués, I., Sánchez-Hurtado, M. Á., Lucas-Hernández, M., & Usón-Gallardo, J. (2012, mayo). Ergonomía en cirugía laparoscópica y su importancia en la formación quirúrgica. *Cirugía Española, Vol. 90* (Núm. 5), páginas 284-291. 10.1016/j.ciresp.2011.04.021
- [7] P. Laguna, M., Lagerveld, B., & de la Rosette, J. (2005, October 8). *Instrumental y generalidades*. SciELO España. Retrieved June 10, 2024, from https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06142005000800016
- [8] Laparoscopia: técnicas y vías de abordaje. (2006, Marzo). *Progresos de Obstetricia y Ginecología, Vol. 49* (Núm. 3), 159-166. DOI: 10.1012/S0304-5013(06)72587-0
- [9] Bo tchorishvili, R., Velemir, L., Wattiez, A., Tran, X., Bolandard, F., Rabischong, B., Jardon, K., Pouly, J. L., Mage, G., & Canis, M. (n.d.). Laparoscopia y cirugía laparoscópica: principios generales e instrumental. *EMC - Ginecología-Obstetricia, Volume 44* (Issue 3), Pages 1-15. [https://doi.org/10.1016/S1283-081X\(08\)70808-7](https://doi.org/10.1016/S1283-081X(08)70808-7).

- [10] Ramos-Salgado, F., Quintero-Becerra, J., & Hernández-Toriz, H. (2009, enero). Modelo para entrenamiento de cirugía laparoscópica urológica. *Revista Mexicana de Urología*, Vol. 70 (Núm. 1), páginas 31-35.
- [11] León Ferrufino, F., Varas Cohen, J., Buckel Schaffner, E., Crovari Eulufi, F., Pimentel Müller, F., Martínez Castillo, J., Jarufe Cassis, N., & Boza Wilson, C. (2015, enero). Simulación en cirugía laparoscópica. *Cirugía Española*, Vol. 93 (Núm. 1), Páginas 4-11. DOI: 10.1016/j.ciresp.2014.02.011
- [12] Justo Janeiro, J. M. (2007, Abr.-Jun.). Sistemas de evaluación de destreza en cirugía endoscópica. *Medigraphic Artemisa en línea*, Vol. 8 (Núm. 2), pp. 90-96.
- [13] Asociación Española de Ergonomía. (n.d.). *¿Qué es la ergonomía?* Asociación Española de Ergonomía. Retrieved June 4, 2024, from <http://www.ergonomos.es/ergonomia.php>
- [14] Berguer, R., Forkey, D. L., & Smith, W. D. (1999, May 1). Ergonomic problems associated with laparoscopic surgery. *Surgical Endoscopy*, 13, pages 466-468.
- [15] Skiadopoulos, Andreas & Gianikellis, Konstantinos & Moreno, Antonio. (2008, Mayo 1). Problemas músculo-esqueléticos en los cirujanos de laparoscopia. *Seguridad y salud en el trabajo*. Vol. 47, páginas 24-34.
- [16] de Velasco Polo, G., Castañeda, L. G., Lasky, D., & Castañeda, P. (1999). Lesiones del cirujano en laparoscopia. *Anales Médicos Hospital ABC*, Vol. 44 (Núm. 1), pp. 31 - 35.
- [17] United Nations (2017) Resolution adopted by the General Assembly on 6 July 2017, Work of the Statistical Commission pertaining to the 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/71/313 Archivado el 23 de octubre de 2020 en Wayback Machine.)
- [18] Unión Europea. (n.d.). Sensor Locations. SENIAM. http://seniam.org/sensor_location.htm

B. PRESUPUESTO

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA
EVALUACIÓN ERGONÓMICA DE HERRAMIENTAS DE
LAPAROSCOPIA BASADO EN LA CAPTACIÓN DE
MOVIMIENTO Y SEÑALES ELECTROMIOGRÁFICAS**

PRESUPUESTO

1. Introducción del presupuesto

Cualquier tipo de proyecto necesita una inversión económica para poder realizarse adecuadamente. Por ello, es necesario un presupuesto que describa adecuadamente el desembolso económico necesario, y así poder desarrollar el proyecto sin contratiempos.

2. Precios descompuestos

Los precios descompuestos son el desglose por conceptos y cantidades de los materiales necesarios para un proyecto, incluyendo la mano de obra. Queda en:

Mano de obra	Tiempo [h]	Coste [€/h]	Importe
Ingeniero realizador del trabajo	380	35,00	13.300,00 €
Ingeniero tutor del trabajo especializado en bioelectrónica	30	50,00	1.500,00 €
Ingeniero cotutor del trabajo especializado en diseño y prototipado	20	50,00	1.000,00 €
Ingeniero cotutor del trabajo especializado en bioelectronica	10	50,00	500,00 €
Total			16.300,00 €

Software	Coste licencia [€]	Importe
LabView Base	536,00	536,00 €
Office 365	237,00	237,00 €
Autodesk Inventor	59,00	59,00 €
Matlab Standard	900,00	900,00 €
Power BI	0,00	- €
Visual Studio Code	0,00	- €
Total		1.732,00 €

Materiales	Unidades	Coste unitario [€/ud]	Importe
Jaula de Faraday	1	4132,23	4.132,23 €
Cámara Video Chat Tyro Trust	1	16,53	16,53 €
Samsung Galaxy Tab S7	1	330,58	330,58 €
iPhone 13	1	512,40	512,40 €
Amplificador de señal P511 de Grass Instrument	1	384,30	384,30 €
Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6229	1	289,26	289,26 €
Pack de 200 electrodos Kendall de Cardinal Health	2	46,28	92,56 €
Ordenador portátil Asus TUF	1	578,51	578,51 €
Ordenador portatil Dell	1	702,48	702,48 €
Kit pelvitrainer Aspire de Laparo® Medical Simulators	1	1091,74	1.091,74 €
Disector laparoscópico 5 mm negro	1	90,08	90,08 €
Pinza laparoscópica 5 mm negra	1	90,08	90,08 €
Total			8.310,74 €

Costes auxiliares	Coste [€]	Importe
Dietas y desplazamientos	120,00	120,00 €
Total		120,00 €

3. Presupuesto de ejecución material

El presupuesto de ejecución material (PEM) es la suma de los precios descompuestos:

Concepto	Importe
Coste de mano de obra	16.300,00 €
Coste de software	1.732,00 €
Coste de materiales	8.310,74 €
Costes auxiliares	120,00 €
Presupuesto de ejecución material (PEM)	26.462,74 €

El presupuesto de ejecución material asciende a un total de VEINTISÉIS MIL CUATROCIENTOS SESENTA Y DOS EUROS Y SETENTA Y CUATRO CÉNTIMOS.

4. Presupuesto de ejecución por contrata y licitación

Al PEM hay que añadirle un 1% de gastos generales, obteniendo el presupuesto de ejecución por contrata (PEC). Y al PEC se le aplica el 21% de IVA, obteniendo finalmente el presupuesto base de licitación:

Concepto	Importe
Presupuesto de ejecución material (PEM)	26.462,74 €
Gastos generales (1% del PEM)	264,63 €
Presupuesto de ejecución por contrata (PEC)	26.727,37 €
IVA (21% del PEC)	5.612,75 €
Presupuesto base de licitación	32.340,12 €

El presupuesto final del proyecto es de un total de TREINTA Y DOS MIL TRESCIENTOS CUARENTA EUROS Y DOCE CÉNTIMOS.

C. ANEXOS

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA
EVALUACIÓN ERGONÓMICA DE HERRAMIENTAS DE
LAPAROSCOPIA BASADO EN LA CAPTACIÓN DE
MOVIMIENTO Y SEÑALES ELECTROMIOGRÁFICAS**

1. Cuestionario de usabilidad para herramientas laparoscópicas.

Introducción

Este cuestionario es una herramienta que se utiliza para medir la carga de trabajo mental percibida por un usuario durante el protocolo definido. Se han utilizado como referencia el cuestionario de la NASA TLX y de la SAGES.

Datos

Edad: _____

Sexo(H/M): _____

Altura (m): _____ Talla de guante: _____

¿Padece usted alguna patología musculoesquelética? _____

En caso afirmativo, ¿cuál?: _____

Herramienta utilizada (A o B): _____

Escala

De acuerdo con la NASA TLX, se va a dividir la prueba en 6 subescalas:

- **Demanda mental:** Esfuerzo mental que requiere la tarea.
- **Demanda física:** Esfuerzo físico que requiere la tarea.
- **Tiempo de esfuerzo:** Percepción del usuario sobre la duración de la tarea.
- **Rendimiento:** Percepción del usuario sobre su propio rendimiento en la tarea.
- **Esfuerzo:** Esfuerzo general que requiere la tarea.
- **Frustración:** Nivel de frustración del usuario durante la tarea.

Cuestionario

A continuación, se presenta el cuestionario adaptado al protocolo, para evaluar las herramientas de laparoscopia.

Responda cada pregunta con una puntuación del 1 al 20, dónde 1 indica la carga de trabajo más baja y 20 la más alta.

Demanda mental

1. ¿Qué tan intuitiva le ha parecido esta herramienta?

Siendo 1 lo menos intuitivo y 20 lo más intuitivo.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

2. ¿Qué tan difícil le ha parecido realizar los siguientes ejercicios?

- Ejercicio del triángulo

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

- Ejercicio de fuerza con goma

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

- Ejercicio del giro de la goma

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

Demanda física

3. ¿Ha experimentado dolor en las siguientes zonas durante los ejercicios?

Si ha experimentado dolor, responda, en la casilla "Intensidad del dolor", con una puntuación del 1 al 20, siendo 1 el dolor más leve y 20 el más intenso.

Zona	Nunca	Ocasionalmente	Frecuentemente	Intensidad del dolor
Cuello				
Hombro				
Mano				
Muñeca				
Espalda				
Pierna				

4. ¿Ha experimentado entumecimiento/hormigueo en las siguientes zonas durante los ejercicios?

Si ha experimentado dolor, responda, en la casilla "Intensidad del dolor", con una puntuación del 1 al 20, siendo 1 el dolor más leve y 20 el más intenso.

Zona	Nunca	Ocasionalmente	Frecuentemente	Intensidad del dolor
Cuello				
Hombro				
Mano				
Muñeca				
Espalda				
Pierna				

5. ¿Ha experimentado dolor en las siguientes zonas después de los ejercicios?

Si ha experimentado dolor, responda, en la casilla "Intensidad del dolor", con una puntuación del 1 al 20, siendo 1 el dolor más leve y 20 el más intenso.

Zona	Nunca	Ocasionalmente	Frecuentemente	Intensidad del dolor
Cuello				
Hombro				
Mano				
Muñeca				
Espalda				

Pierna				
--------	--	--	--	--

6. ¿Ha sentido dolor de cabeza (migrañas, presión, punzadas, ...)? (Sí/No):

En caso afirmativo, ¿qué intensidad tenía el dolor?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

7. ¿Cuánto se ha cansado en los siguientes ejercicios?

- Ejercicio del triángulo

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

- Ejercicio de fuerza con goma

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

- Ejercicio del giro de la goma

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

8. ¿Cree que se le ha adaptado bien la herramienta a la mano?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

9. ¿Qué tan incómodas han sido las posturas adoptadas durante los ejercicios?

- Ejercicio del triángulo

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

- Ejercicio de fuerza con goma

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

- Ejercicio del giro de la goma

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Rendimiento

10. ¿Cree que toda la fuerza ejercida se ha transmitido a la punta de la pinza?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

11. ¿Qué tan precisa nota la herramienta?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Esfuerzo y tiempo de esfuerzo

12. ¿Cuánto tiempo cree que le ha dedicado a cada ejercicio?

Responda con una puntuación del 1 al 20, siendo 1 el muy poco tiempo y 20 mucho tiempo.

- **Ejercicio del triángulo**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

- **Ejercicio de fuerza con goma**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

- **Ejercicio del giro de la goma**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

Frustración

13. ¿Qué tan frustrado se ha sentido durante los ejercicios?

- **Ejercicio del triángulo**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

- **Ejercicio de fuerza con goma**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

- **Ejercicio del giro de la goma**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

14. ¿Tuvo ganas de renunciar mientras realizaba los ejercicios?

- **Ejercicio del triángulo**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

- **Ejercicio de fuerza con goma**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

- **Ejercicio del giro de la goma**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

**15. Con relación de las dos (déjala en blanco si solo has probado 1):
¿Qué herramienta te gusta más? ¿Por qué? Desarrolla 3 características que te hayan gustado.**

2. Código Python del programa de captación de movimiento

```
import cv2

import mediapipe as mp

import pandas as pd

import numpy as np

import os

mp_draw = mp.solutions.drawing_utils

mp_postura = mp.solutions.pose

mp_segmentation = mp.solutions.selfie_segmentation

#Direcciones de los videos

video= input('Direccion del video:')

sesion = input('ID de la sesion:')

tipo = input('Plano de grabacion (Lateral o Frontal):')

tool = input('Herramienta utilizada (A o B):')

#Captura de los videos

cap = cv2.VideoCapture(video)

#Obtencion de tamaño de las imagenes de los videos

dim_image = [cap.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH),
cap.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT)]

fps = cap.get(cv2.CAP_PROP_FPS)

#Configuracion del video de salida

output_path = 'C:\\Users\\sanch\\iCloudDrive\\2
Documentos\\TFG\\Programa\\Deteccion-video\\Videos tratados\\'

#Se generan las carpetas por sesion

folder = sesion + '_' + tipo + '_' + tool

dir_sesion = os.path.join(output_path, folder)

os.makedirs(dir_sesion, exist_ok=True)
```

```

fourcc = cv2.VideoWriter_fourcc(*'avc1')

video_out = cv2.VideoWriter(dir_sesion, fourcc, fps, (1280,720))

#Creacion del DataFrame de los datos guardados

columns = ['ID Sesion', 'Tool', 'Plano', 'Frame', 'Tiempo',

           'Right_Soulder X', 'Right Shoulder Y',

           'Right Elbow X', 'Right Elbow Y',

           'Right Wrist X', 'Right Wrist Y',

           'Right Hip X', 'Right Hip Y',

           'Right Fist X', 'Right Fist Y',

           'Angulo hombro',

           'Angulo codo',

           'Angulo mano']

data = []

#Calculo de los angulos

def calculate_angle(a,b,c):

    a = np.array(a) #First

    b = np.array(b) #Mid

    c = np.array(c) #End

radians = np.arctan2(c[1]-b[1], c[0]-b[0]) - np.arctan2(a[1]-b[1],

c[0]-b[0])

    angle = np.abs(radians*180.0/np.pi)

    if angle > 180.0:

        angle = 360 - angle

    return angle

#Configuracion de MediaPipe Pose Detection

with mp_postura.Pose(min_detection_confidence=0.7,

min_tracking_confidence=0.7,static_image_mode=False,

enable_segmentation=True) as pose:

    frame_count = 0

```

```

wait_ms = 1000.0/fps

#Bucle tratamiento de imagen

while True:

    success, image = cap.read()

    #Comprobacion de que hay nas frames en el video

    if success == False:

        print('Video no disponible')

        break

    #Camnio de resolucioin de la imagen

    image = cv2.resize(image, dsize=(1280, 720))

    dim_image = (1280, 720)

    #Cambio de color a RGB

    image = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2RGB)

    #Procesamiento de imagen con MediaPipe Pose

    results = pose.process(image)

    marcador = results.pose_landmarks

    #Se muestran los marcadores en la imagen

    try:

        landmarks = marcador.landmark

        #Se obtienen las coordenadas del lado derecho

        right_shoulder = (int(landmarks[12].x*dim_image[0]),
int(landmarks[12].y*dim_image[1]))

        right_elbow = (int(landmarks[14].x*dim_image[0]),
int(landmarks[14].y*dim_image[1]))

        right_wrist = (int(landmarks[16].x*dim_image[0]),
int(landmarks[16].y*dim_image[1]))

        right_hip = (int(landmarks[24].x*dim_image[0]),
int(landmarks[24].y*dim_image[1]))

        right_fist = (int(landmarks[18].x*dim_image[0]),
int(landmarks[18].y*dim_image[1]))

```

```

        #Se obtienen las coordenadas del lado izquierdo

        left_shoulder = (int(landmarks[11].x*dim_image[0]),
int(landmarks[11].y*dim_image[1]))

        left_elbow = (int(landmarks[13].x*dim_image[0]),
int(landmarks[13].y*dim_image[1]))

        left_wrist = (int(landmarks[15].x*dim_image[0]),
int(landmarks[15].y*dim_image[1]))

        left_hip = (int(landmarks[23].x*dim_image[0]),
int(landmarks[23].y*dim_image[1]))

        left_fist = (int(landmarks[17].x*dim_image[0]),
int(landmarks[17].y*dim_image[1]))

        #Calculo de los angulos

        right_angles = (calculate_angle(right_hip,
right_shoulder, right_elbow),

        calculate_angle(right_shoulder,
right_elbow, right_wrist),

        calculate_angle(right_elbow,
right_wrist, right_fist))
except:

    pass

    #Muestra de las marcas

    mp_draw.draw_landmarks(

        image, marcador, mp_postura.POSE_CONNECTIONS,

        mp_draw.DrawingSpec(color = (128,0,250), thickness =
2, circle_radius = 4),

        mp_draw.DrawingSpec(color = (255,255,255), thickness
= 2))

    #Se dibujan las marcar

    cv2.line(image, right_shoulder, right_elbow, (255,0,0),
thickness=15)

    cv2.line(image, right_shoulder, right_hip, (255,0,0),
thickness=15)

```

```

        cv2.line(image, right_wrist, right_elbow, (255,0,0),
thickness=15)

        cv2.line(image, right_wrist, right_fist, (255,0,0),
thickness=15)

        cv2.line(image, left_shoulder, left_elbow, (0,0,255),
thickness=3)

        cv2.line(image, left_shoulder, left_hip, (0,0,255),
thickness=3)

        cv2.line(image, left_wrist, left_elbow, (0,0,255),
thickness=3)

        cv2.line(image, left_wrist, left_fist, (0,0,255),
thickness=3)

    #Se muestra la imagen tratada
    cv2.imshow('Video Tratado', image)

    video_out.write(image)

    frame_count+=1

    time_ms=frame_count*wait_ms

    #Se guardan los datos en el DataFrame
    data.append([sesion, tool, tipo, frame_count, time_ms,
                right_shoulder[0], right_shoulder[1],
                right_elbow[0], right_elbow[1],
                right_wrist[0], right_wrist[1],
                right_hip[0], right_hip[1],
                right_fist[0], right_fist[1],
                right_angles[0],
                right_angles[1],
                right_angles[2])

    if cv2.waitKey(1) == 27:

        break

```

```
#Se guardan los datos

df = pd.DataFrame(data, columns=columns)

directorio = 'C:\\Users\\sanch\\iCloudDrive\\2
Documentos\\TFG\\Programa\\Deteccion-video\\Datos adquiridos\\'

datos = directorio + sesion + '_' + tipo + '_' + tool + '.xlsx'

df.to_excel(datos, index=False)

cap.release()

cv2.destroyAllWindows()
```