



**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**Artículo Académico Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en  
Mecatrónica**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO MECÁNICO PARA TAREAS DE  
REHABILITACIÓN TELE-OPERADO PARA PERSONAS CON LESIONES DE  
MOVILIDAD EN RODILLAS**

**Autores:**

Lascano Córdova, Iliana Carolina  
**Carrera Andrango, Pablo Bladimir**

Ing. Ph.D. Andaluz Ortiz, Víctor Hugo. *Tutor*  
Ing. Arteaga López, Oscar Bladimir. *CoTutor*



# Telerehabilitation for People with Knee Mobility Injuries

Pablo B. Carrera, Iliana C. Lascano, Oscar B. Arteaga and  
Victor H. Andaluz

Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolquí, Ecuador  
(pbcarrera, iclascano, obarteaga, vhandaluz1)@espe.edu.ec

**Abstract.** Nowadays, telerehabilitation is a feasible alternative to traditional rehabilitation services. In this context, we present a bilateral tele-rehabilitation system for people with knee injuries, through the execution of remote rehabilitation routines. The rehabilitation prototype is designed in CAD/CAE software; given its complexity, the finite element method is used to detect possible failures due to the dimensioning and the safety factor. The system control scheme is based on autonomous control algorithms and bilateral teleoperation theory. At the local station, the physiotherapist generates rehabilitation routines using the **Novint Falcon** haptic device and a computer, the information sent to the remote station is received and the patient interact with the prototype by executing the programmed flexion and extension movements. In addition, the physiotherapist receives visual, auditory and force feedback from the remote site for better system transparency. Finally, the experimental results show the performance of the proposed system. Usability tests are also conducted with different users in an experimental environment.

**Keywords:** Telerehabilitation, Mechanical Design, Autonomous Control, Haptic device.

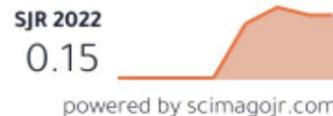
## 1 Introduction

Disability is a condition that limits a human being's ability to perform everyday activities [1]. Persons with disabilities include those with physical, mental, intellectual or sensory impairments [2]. About 15% of the world's population has some type of disability [3]. It is likely that almost everyone at some point in their lives will experience some type of disability, whether temporary or permanent [3]. One of the main causes of this physical limitation are injuries [4]. In terms of lower extremity injuries, knee injuries are the most frequent [5]. This knee trauma is a risk factor for the development of knee osteoarthritis in young adults, with four to six times higher odds, compared to an uninjured knee [6].

In recent years, technological and medical advances have gone hand in hand, through the development of different lines of application with essential devices for the prevention, diagnosis and treatment of diseases; relevant in rehabilitation [7]. Globally, an estimated 2.4 billion people have a health condition, which benefits from rehabilitation [8].



Lecture Notes in Networks  
and Systems



FICC 2024

Future of Information and Communication Conference (FICC) 2024  
4-5 April 2024 | Berlin

27 July 2023

Acceptance Letter - Future of Information and Communication Conference (FICC) 2024

Dear Iliana C. Lascano, Pablo B. Carrera, Oscar B. Arteaga, Victor H. Andaluz,

Congratulations! Your paper "Telerehabilitation for people with knee mobility injuries" has been accepted for oral presentation in the Future of Information and Communication Conference (FICC) 2024 to be held from 4-5 April 2024, Berlin, Germany.

Future of Information and Communication Conference has emerged as the foremost world-wide gathering of academic researchers, Ph.D. & graduate students, top research think tanks & industry technology developers. Future of Information and Communication Conference presents the best of current systems research and practice, emphasizing innovation and quantified experience.

Each of the manuscripts for this conference was reviewed based on the criteria of originality, significance, quality and clarity. We have followed double blind peer review process and each paper was reviewed by at least three regular PC members or two senior PC members.

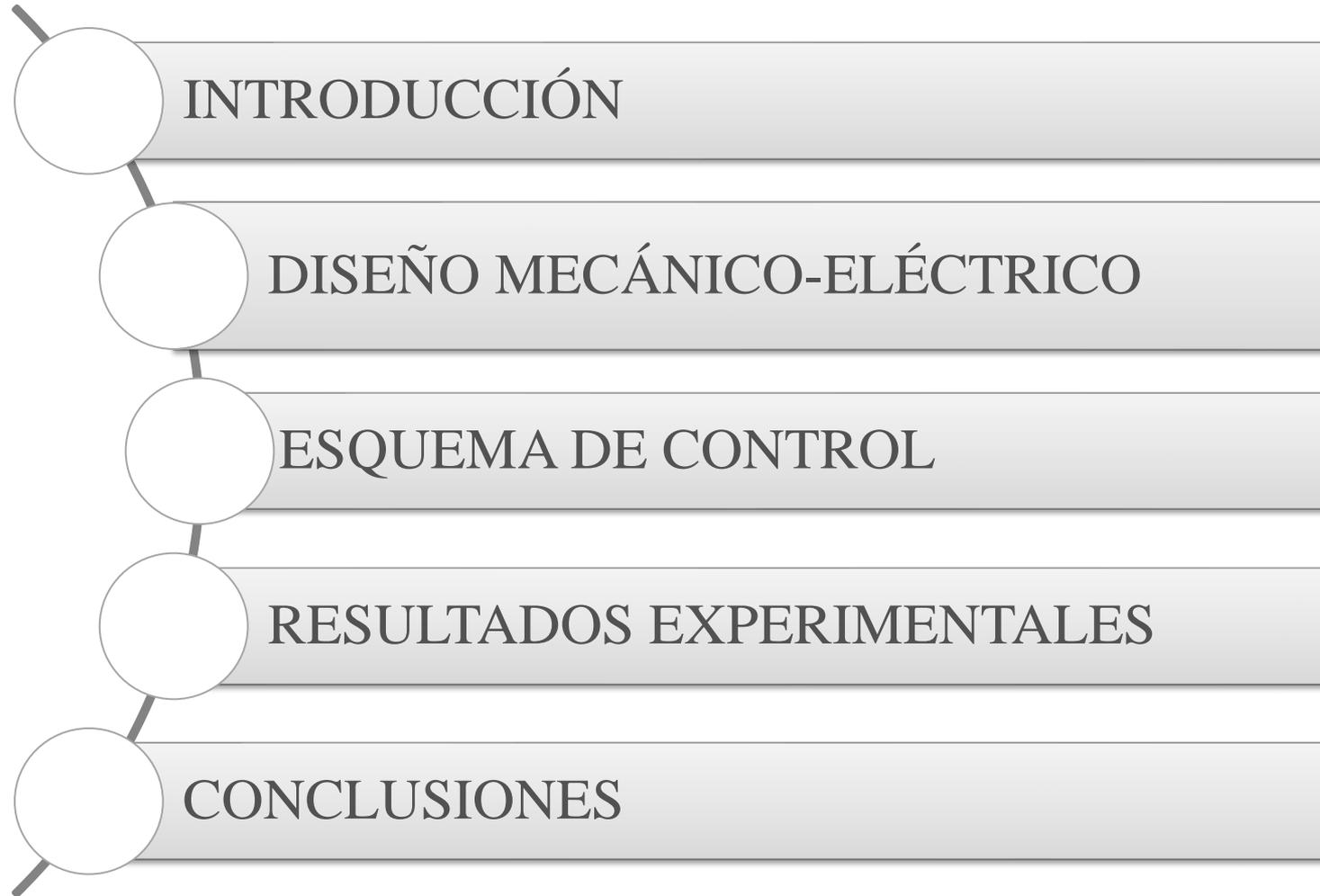
Future of Information and Communication Conference proceedings will be published in Springer series "Lecture Notes in Networks and Systems" (ISSN: 2367-3370) and submitted for consideration to Scopus, Web of Science, DBLP, INSPEC, WTI Frankfurt eG, zbMATH, SCImago.

You may now proceed with the registration process for publication and presentation of your paper at Future of Information and Communication Conference (FICC) 2024.

Online Registration: <http://saiconference.com/FICC>

Regards,  
Supriya Kapoor  
Conference Manager  
Future of Information and Communication Conference (FICC) 2024  
<http://saiconference.com/FICC>







## Convencional



## Mecanismos de rehabilitación



## Asistidos



## Teleoperados



En el área de la rehabilitación se busca plantear nuevas formas de ejecutar rutinas de recuperación :

Acceso limitado



Retardo en la recuperación

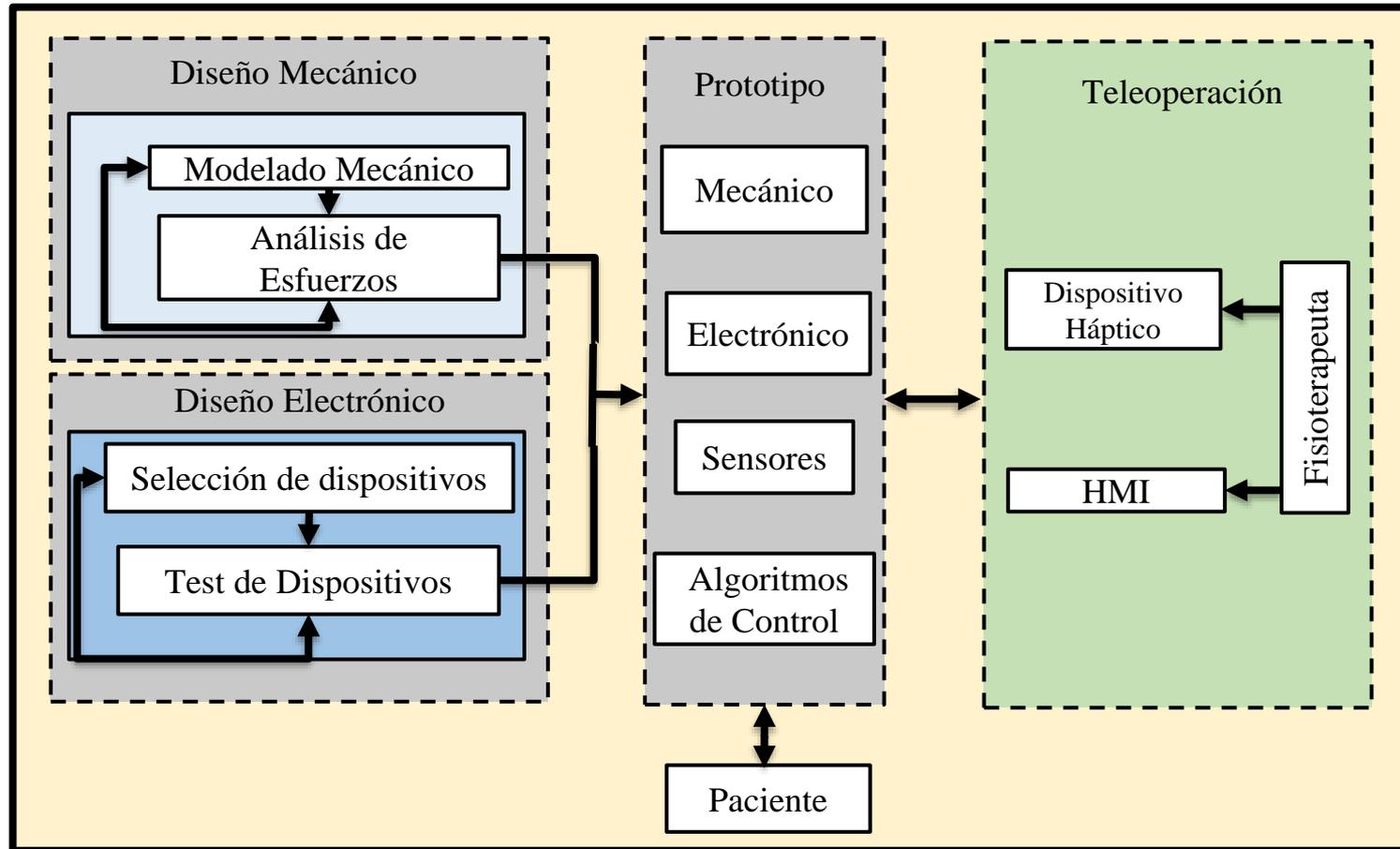
Por esto se propone un mecanismo de telerehabilitación.



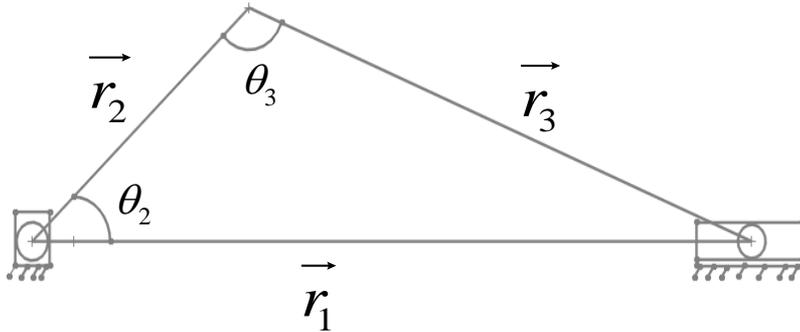
**Diseñar y construir** un prototipo mecánico para tareas de **telerehabilitación** para personas con lesiones de movilidad en rodillas.

- **Investigar** en diferentes bases de datos científicas acerca de la **construcción y control autónomo y tele-operado** de mecanismos de rehabilitación para personas con lesiones de movilidad en rodilla.
- **Construir** un prototipo mecánico que permita **la movilidad de extremidades inferiores** para personas con lesiones de movilidad en rodillas.
- **Acondicionar** señales eléctricas de los **sensores propioceptivos** para el monitoreo e implementación de algoritmos de control, autónomos y tele-operados, para la ejecución de **rutinas de rehabilitación**.

- **Proponer un esquema de control en lazo cerrado** que permita ejecutar tareas de rehabilitación para personas con lesiones de movilidad en rodillas. El control del prototipo podrá ser de manera autónoma o tele-operada a través de dispositivos hápticos.
- **Evaluar experimentalmente** el desempeño del sistema de rehabilitación desarrollado. para las pruebas experimentales se considerará **personas sin lesiones** por lo tanto, se implementará un **test de usabilidad** a fin de evaluar el sistema de rehabilitación desarrollado.







El sistema rehabilitador está basado en el mecanismo biela manivela.

$$\vec{r}_1 = \vec{r}_2 + \vec{r}_3$$

- $\vec{r}_1$  Vector corredera
- $\vec{r}_2$  Vector manivela
- $\vec{r}_3$  Vector biela



Ecuación de movimiento

$$v_1(t) = -r_2 \omega_2 \sin(\theta_2) - r_2 \omega_2 \cos(\theta_2) \tan(\theta_3)$$

## *Peso a considerar*

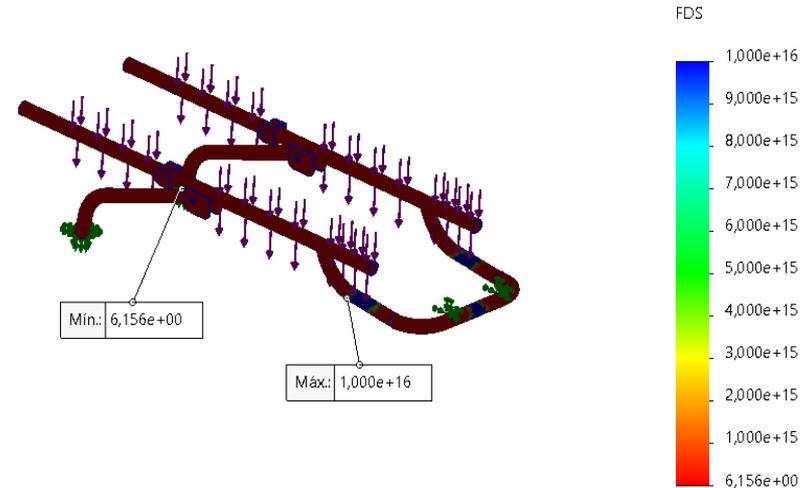
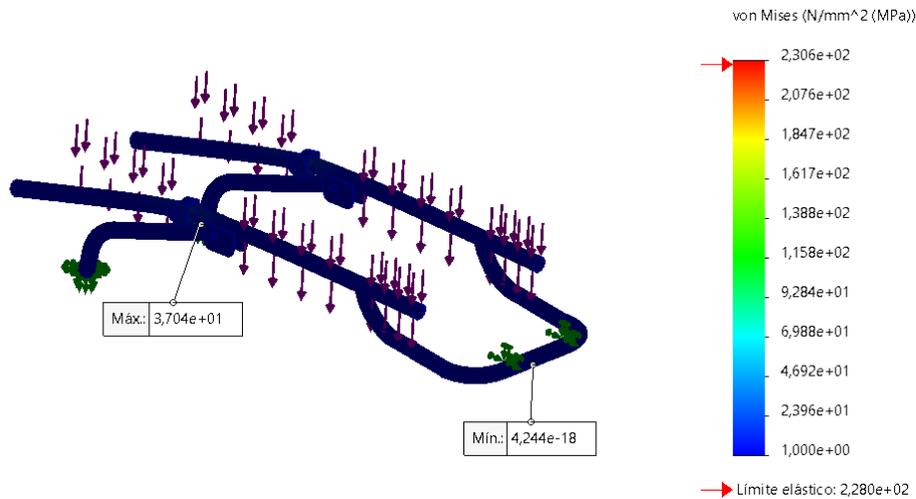
Miembro	Porcentaje del peso total de una persona (%)
Pierna debajo de la rodilla	7
Pierna arriba de la rodilla	11

## *Detalles de la estructura*

Geometría	Tubo redondo
Medidas	Diámetro externo $\frac{3}{4}$ in, espesor 2mm
Material	Acero ASTM A36

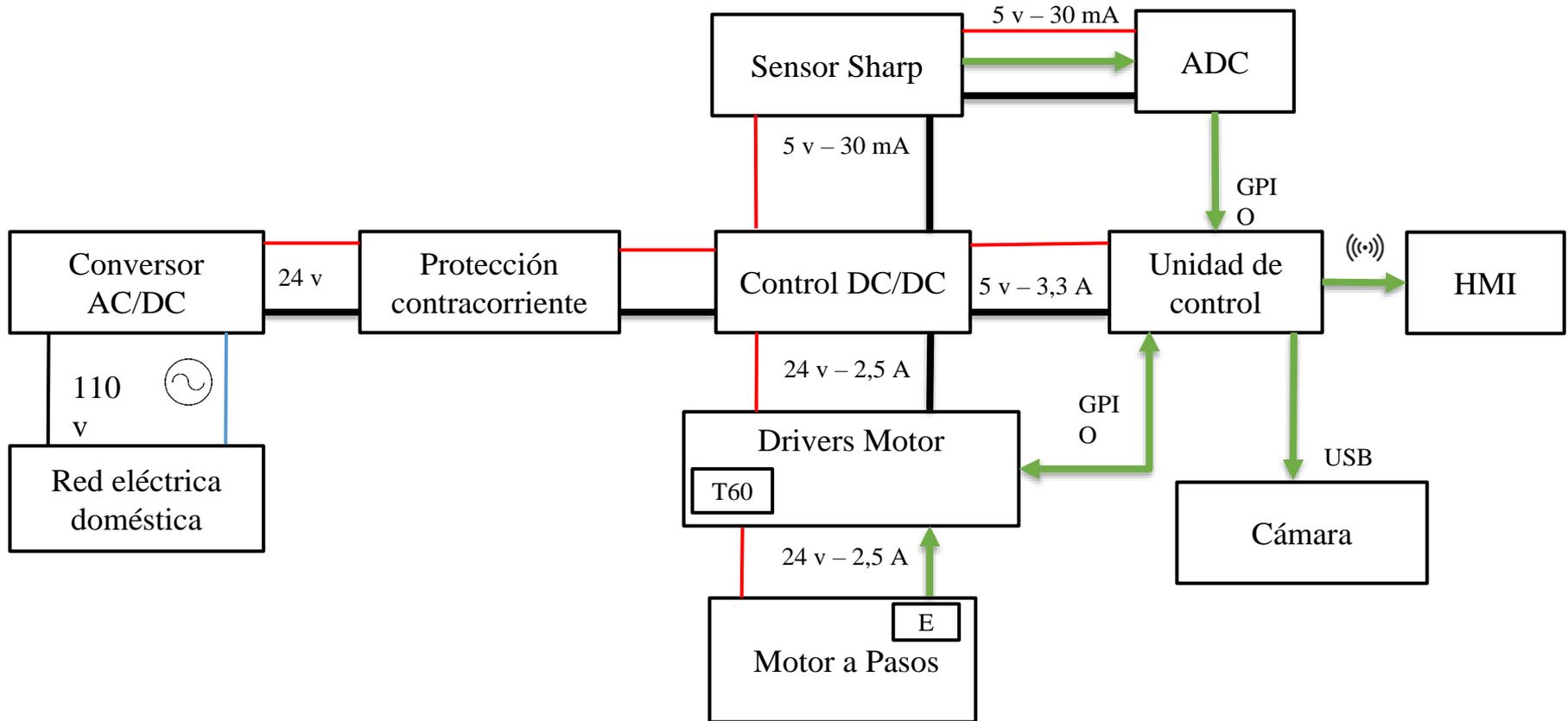
## *Detalles del material*

Módulo elástico	200GPa
Límite elástico	250 MPa
Límite de tracción	400 MPa

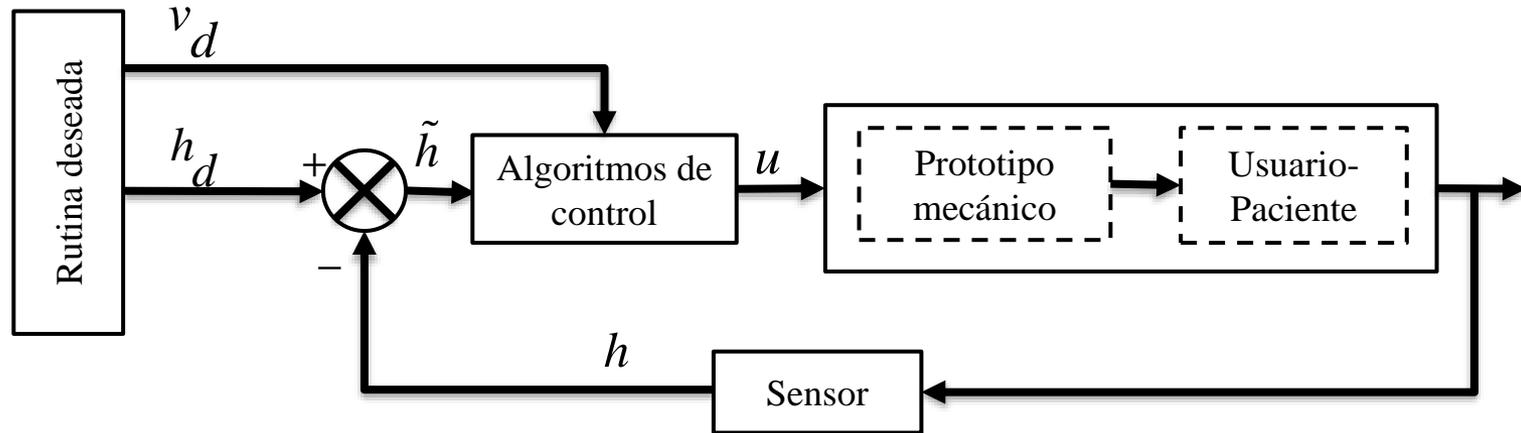


El rehabilitador no experimenta esfuerzos que excedan su límite elástico.

El factor de seguridad habilita a la estructura mecánicamente como seguro.







**Tarea:**

**Seguimiento:**  $h_d$  es variable; y  $v_d \neq 0$

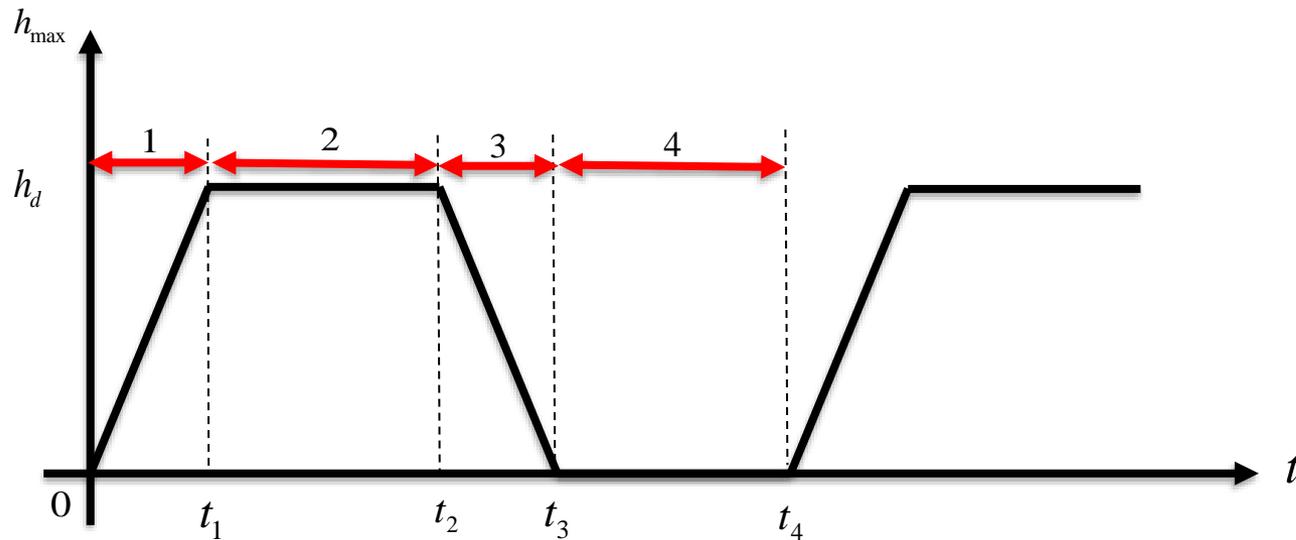
**Dimensiones:**

$h_d(t)$  y  $h(t) \in \mathbb{R}^+$ ;  $\tilde{h}(t) \in \mathbb{R}$ ; y  $u(t) \in [0, 24]$

**Objetivo de control:**

$\lim_{t \rightarrow \infty} (h_d(t) - h(t)) = 0$  con  $\tilde{h}(t) = h_d(t) - h(t)$

El fisioterapeuta define la rutina de rehabilitación en función del grado de lesión.



➔

$$h_d(t) = \begin{cases} \frac{h_d}{t_1} t, & \text{if } 0 \leq t < t_1 \\ h_d, & \text{if } t_1 \leq t_{pe} < t_2 \\ h_d \left( \frac{t_3 - t}{t_3 - t_2} \right), & \text{if } t_2 \leq t < t_3 \\ 0, & \text{if } t_3 \leq t_{pf} < t_4 \end{cases}$$

$$u(t) = k_c \left[ \tilde{h}(t) + \frac{1}{\tau_i} \int \tilde{h}(t) dt + \tau_d \frac{d}{dt} \tilde{h}(t) \right] + v_d(t)$$

Donde:

$u(t)$  Señal de control

$v_d$  Velocidad deseado

$\tilde{h}(t)$  Error de control definida como:  $\tilde{h}(t) = h_d - h$

$k_c$  Ganancia proporcional del controlador

$\tau_i$  Tiempo integral

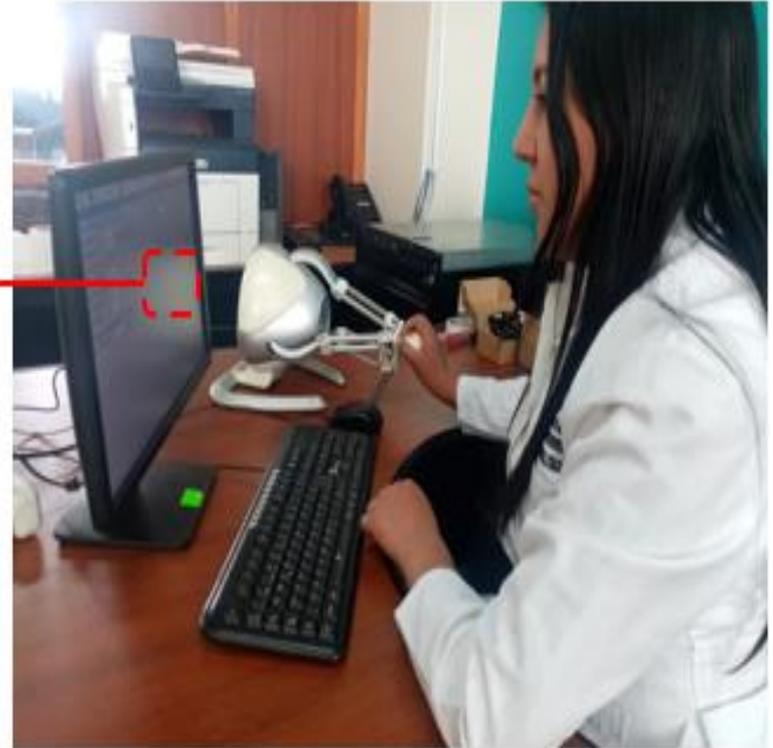
$\tau_d$  Tiempo derivativo





▪ Paciente

*vídeo*



▪ Fisioterapeuta

## *Dispositivo Novit Falcon*



- Espacio de trabajo táctil 3D (in): 4 x 4 x 4
- Capacidad de fuerza (lbf): 2
- Resolución de posición: 400 dpi
- Grados de libertad de entrada: 3
- Grados de libertad de salida: 3

## HMI – Registro de pacientes

TELEREHABILITATION FOR PEOPLE WITH KNEE MOBILITY INJURIES

HOME REHABILITATION

NAMES  ID:  AGE

SURNAMES  WEIGHT  HEIGHT

INJURY  NUM. SESION  TELEOPERATION  OBSERVATIONS

**OPCIONES DE REGISTRO**

REGISTRATION CHANGE REGISTER GENERATE PDF SEARCH REGISTERS

Item	Date	Hour	Names	Surnames	Age	ID	Weight	Height	Lesion Type	Num_Sesion	Teleoperation	Obse
40	23/08/21	22:09:51	PABLO BLADIMIR	CARRERA ANDRA	27	0504287436	56 Kg	1.62 m	LIGATURE STRETCHING	1	no	RIGHT
39	23/08/21	22:09:48	PABLO BLADIMIR	CARRERA ANDRA	27	0504287436	56 Kg	1.62 m	LIGATURE STRETCHING	1	no	RIGHT
38	23/08/21	22:09:46	PABLO BLADIMIR	CARRERA ANDRA	27	0504287436	56 Kg	1.62 m	LIGATURE STRETCHING	1	no	RIGHT
37	23/08/21	22:09:44	PABLO BLADIMIR	CARRERA ANDRA	27	0504287436	56 Kg	1.62 m	LIGATURE STRETCHING	1	no	RIGHT
36	23/08/21	22:09:41	PABLO BLADIMIR	CARRERA ANDRA	27	0504287436	56 Kg	1.62 m	LIGATURE STRETCHING	1	no	RIGHT
35	23/08/21	22:09:38	PABLO BLADIMIR	CARRERA ANDRA	27	0504287436	56 Kg	1.62 m	LIGATURE STRETCHING	1	no	RIGHT
34	23/08/21	22:09:35										
33	23/08/21	22:09:34	PABLO BLADIMIR	CARRERA ANDRA	27	0504287436	56 Kg	1.62 m	LIGATURE STRETCHING	1	no	RIGHT
32	23/08/21	22:09:31										
31	23/08/21	22:09:31										
30	23/08/21	22:09:30										
29	23/08/21	22:09:30	PABLO BLADIMIR	CARRERA ANDRA	27	0504287436	56 Kg	1.62 m	LIGATURE STRETCHING	1	no	RIGHT
28	23/08/21	22:09:21	PABLO BLADIMIR	CARRERA ANDRA	27	0504287436	56 Kg	1.62 m	LIGATURE STRETCHING	1	no	RIGHT
27	23/08/21	22:09:11	PABLO BLADIMIR	CARRERA ANDRA	27	0504287436	56 Kg	1.62 m	LIGATURE STRETCHING	1	no	RIGHT
26	23/08/21	22:08:21	PABLO BLADIMIR	CARRERA ANDRA	27	0504287436	56 Kg	1.62 m	ESTIRAMIENTO LIGAMENTA	1	no	RIGHT
25	23/08/21	22:07:28										
24	23/08/21	21:34:06	pablo	carrera	27	1502578412	53	1.65	rodilla	2	no	s/n
23	23/08/21	21:00:55	PABLO BLADIMIR	CARRERA ANDRA	27	0504287436	56 Kg	1.62 m	ESTIRAMIENTO LIGAMENTA	1	no	LESIO
22	05/08/21	21:42:44	PABLO	CARRERA	28	1728071570	53	1,50	ESGUINCE DE RODILLA PAI	1		
21	05/08/21	16:55:57	PABLO	CARRERA	27	172824565	53 Kg	1.6	RODILLA	5	si	s/n

REHABILITATION ROUTINE

**TRAVEL CONFIGURATION IN cm**

STARTING DISTANCE  FINAL DISTANCE

**MECHANISM DATA**

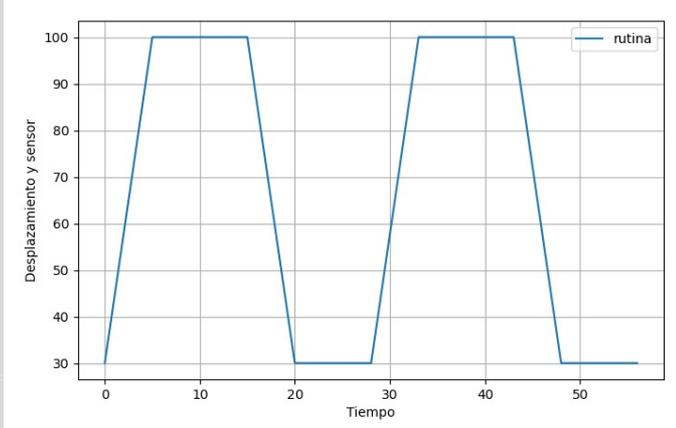
SPEED [cm/s]

**ROUTINE CONFIGURATION**

ROUTINE SPEED  NUMBER OF REPETITIONS  EXTENSION PAUSE  FLEXION PAUSE

**DISPLACEMENT VS TIME GRAPH**

DISPLACEMENT [CM]



The graph shows displacement in centimeters on the y-axis (ranging from 30 to 100) against time in seconds on the x-axis (ranging from 0 to 50). The data series, labeled 'rutina', shows two identical trapezoidal pulses. The first pulse starts at 0s, rises to 100cm by 5s, stays constant until 15s, falls to 30cm by 20s, and remains constant until 30s. The second pulse starts at 30s, rises to 100cm by 35s, stays constant until 45s, falls to 30cm by 50s, and remains constant until 55s.



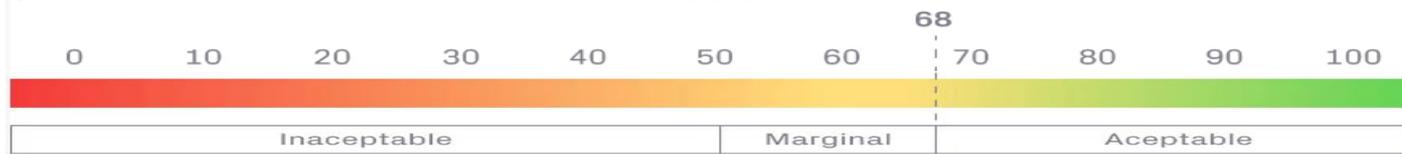
A photograph showing a person lying on a specialized rehabilitation machine. The machine is positioned on a tiled floor and appears to be designed for lower limb rehabilitation, possibly for knee or hip movement. The person is wearing dark clothing and white socks.

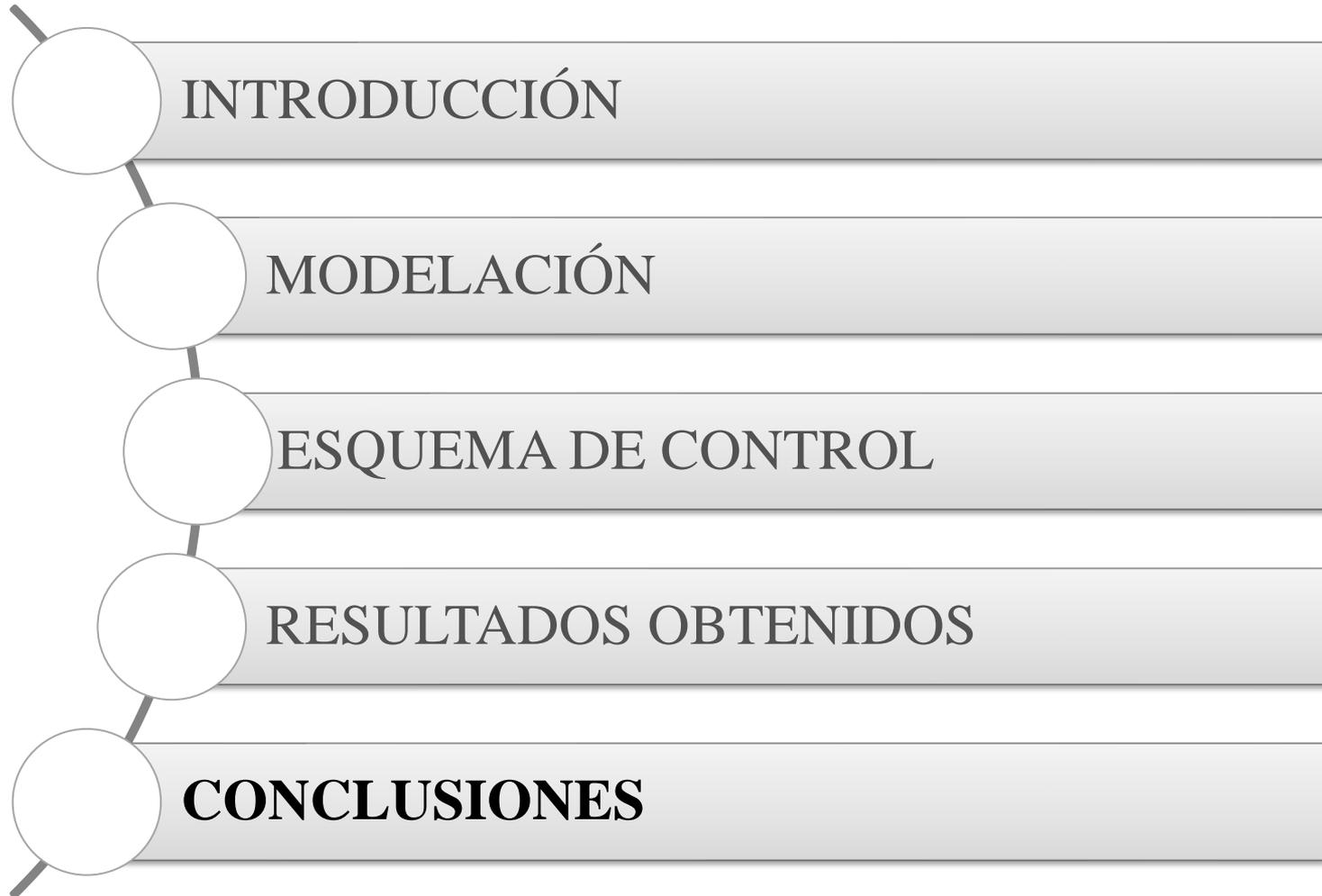
*Vídeo*

Se consideró a 5 fisioterapeutas

Nº	Preguntas	Puntuación	Operación
P1	Creo que me gustaría utilizar este rehabilitador con frecuencia.	5	5 - 1 = 4
P2	El rehabilitador me pareció complejo de usar.	1	5 - 1 = 4
P3	El rehabilitador me pareció fácil de usar.	3	3 - 1 = 2
P4	Creo que necesitaría el apoyo de un técnico para poder utilizar este rehabilitador.	2	5 - 2 = 3
P5	Me pareció que las distintas funciones de este rehabilitador estaban bien integradas.	5	5 - 1 = 4
P6	Me pareció que había demasiada incoherencia en este rehabilitador.	1	5 - 1 = 4
P7	Me imagino que la mayoría de los usuarios aprenderán a utilizar este rehabilitador muy rápidamente.	4	4 - 1 = 3
P8	El rehabilitador me resultó muy incómodo de usar	2	5 - 2 = 3
P9	Me sentí muy seguro utilizando el rehabilitador.	4	4 - 1 = 3
P10	Necesitaba aprender varias cosas antes de poder utilizar este rehabilitador.	3	5 - 3 = 2
<b>TOTAL</b>			<b>32 x 2.5 = 80</b>

Representación de los resultados del SUS





- Se desarrolló un sistema de telerehabilitación para personas con lesiones de movilidad en rodillas. El sistema propuesto consta de dos modos de operación: *i) control autónomo*, permite al sistema ajustarse a las rutinas con movimientos prede-finidos, es decir, sin la intervención constante de fisioterapeuta; y *ii) control tele-operado*, donde el fisioterapeuta interactúa directamente con el paciente mediante el dispositivo háptico Novit Falcon para definir rutinas de rehabilitación.
- El sistema de telerehabilitación permite la comunicación en tiempo real entre el fisioterapeuta y el paciente, por lo tanto, existe un seguimiento cercano de la evolución del paciente a través de los datos recolectados durante las sesiones de rehabilitación remotas,
- Se presentaron los resultados obtenidos y la aplicación de una prueba de usabilidad con un 80% de aceptación del sistema de telerehabilitación propuesta.



**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**Artículo Académico Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en  
Mecatrónica**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO MECÁNICO PARA TAREAS DE  
REHABILITACIÓN TELE-OPERADO PARA PERSONAS CON LESIONES DE  
MOVILIDAD EN RODILLAS**

**Autores:**

Lascano Córdova, Iliana Carolina  
**Carrera Andrango, Pablo Bladimir**

Ing. Ph.D. Andaluz Ortiz, Víctor Hugo. *Tutor*  
Ing. Arteaga López, Oscar Bladimir. *CoTutor*

