



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS  
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
UNIDAD ZACATENCO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
SECCIÓN MECATRONICA

**Controladores de interacción robot humano  
en robots de rehabilitación**

TESIS

Que presenta  
**Fernando Paredes Gómez**

Para obtener el grado de  
**Maestro en Ciencias**

En la especialidad de  
**Ingeniería Eléctrica**

Directores de tesis:  
**Dr. Carlos Alberto Cruz Villar**  
**Dr. Jesús Enrique Chong Quero**

Ciudad de México

Febrero 2023

---

## Agradecimientos

---

**Al Dr. Carlos Alberto Cruz Villar:** por compartir conmigo su sabiduría y perspicacia, por los momentos de camaradería y por sus consejos con los que construí una mejor versión de mi mismo.

**Al Dr. Enrique Chong Quero y al tecnológico de Monterrey:** por brindarme las herramientas, espacio y tiempo, para que yo pudiera culminar con mi proyecto de tesis.

**A mi novia Valeria:** por estar conmigo en cada etapa de la maestría pues su esencia me brinda paz en los momentos de incertidumbre y de motivación en los momentos de entrega.

**A mis padres:** por apoyarme en los momentos cruciales para la culminación de mi trabajo.

**A mis compañeros: Arturo, Eduardo, Daniel y Talia** por sus ideas y consejos para mi trabajo y por hacer más amena mi estancia durante la maestría.

**Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) :** Por haberme otorgado una beca para realizar mis estudios de maestría en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, (CINVESTAV)

---

# Resumen

---

El presente trabajo muestra la implementación de 5 controladores de interacción robot-humano sobre un robot de rehabilitación de un grado de libertad con efector final interactivo, con el propósito de comparar los resultados entre estos al momento de realizar una tarea deseada.

El sistema mecánico está compuesto por un sistema de transmisión lineal que permite la ejecución de *movimiento alcanzado* (RM por sus siglas en inglés). El sistema electrónico está compuesto por una tarjeta de adquisición de datos de National Instrument y circuitos electrónicos que permiten la adquisición, filtrado y envío de datos, mediante MatLab, de los sensores, motor y generar un entorno gráfico. Mediante el diseño de una interfaz gráfica para el usuario, de una trayectoria deseada como ejercicio y la implementación de los controladores, la plataforma experimental permite de una manera eficiente llevar a cabo ejercicios activos y obtener índices de desempeño como la integral del error absoluto, la integral del error cuadrático, la integral temporal del error absoluto y la integral temporal del error cuadrático, con cada control.

Los controles integrados en esta tesis se basan en el control de impedancia propuesto por Hogan. El cual establece que, al cambiar la impedancia del manipulador, la interacción dinámica entre este y su ambiente puede ser controlada.

Como instrumento de evaluación se diseñó una encuesta de 8 preguntas con escala Likert y se seleccionaron 3 de los 5 controladores para ser probados por una población de 150 personas; con el objetivo de hacer un análisis de factores exploratorio para determinar las variables latentes de la percepción humana al hacer el ejercicio con cada controlador.

Durante el desarrollo del presente trabajo se muestran las bases teóricas de los cinco controladores implementados, el resultado del análisis exploratorio para los 3 controladores seleccionados y se finaliza con el análisis general de los resultados obtenidos.

---

# Abstract

---

This thesis work addresses the comparison of 5 physical human-robot interaction controllers while performing a desired task.

The mechanical system is composed of a linear transmission system that allows reaching movements. The electronic system is made up of a National Instrument data acquisition card and electronic circuits that allows the acquisition, filtering and sending of data, through MatLab, from the sensors, motor and generate a graphic environment. Through the design of a graphical user interface, a desired trajectory as an exercise, and the implementation of the controllers, the experimental platform allows to efficiently carry out active exercises and obtaining performance indexes with each controller.

Controllers considered in this thesis are based on the impedance control proposed by Hogan, which establishes that, by changing the impedance of the manipulator, the dynamic interaction between it and its environment can be controlled.

A survey of 8 questions with Likert scale was designed, three out of the five controllers were selected to be tested by a population of 150 people. So an exploratory factor analysis can be used to determine the latent variables of human perception, when performing the exercise with each controller.

Throughout the development of this work, the theoretical basis of the five implemented controllers are presented, the result of the exploratory analysis for the three selected controls and ends with the general analysis of the obtained results.

# Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract	IV
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	IX
Abreviaturas	XI
Notación	XII
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Estado del arte . . . . .	3
1.2 Motivación y justificación . . . . .	7
1.3 Objetivo principal . . . . .	7
1.4 Objetivos particulares . . . . .	7
1.5 Organización del documento . . . . .	8
<b>2 Marco teórico</b>	<b>9</b>
2.1 Mecanismos y dispositivos relevantes . . . . .	10
2.1.1 Mecanismo husillo-tuerca para movimiento traslacional . . . . .	10
2.1.2 Encoder incremental . . . . .	10
2.1.3 Celda de carga . . . . .	10
2.2 Conceptos y principios de los controles implementados . . . . .	11
2.2.1 Control de impedancia . . . . .	11

## Índice general

---

2.2.2	Control de admitancia . . . . .	12
2.2.3	Control de admitancia adaptable . . . . .	12
2.2.4	Control de impedancia adaptable basado en estimación de movimiento . . . . .	13
2.2.5	Control de complianza basado en el modelo Maxwell . . . . .	13
2.3	Índices de desempeño . . . . .	14
2.4	Análisis de factores . . . . .	15
2.4.1	Análisis de factores exploratorio y confirmatorio . . . . .	15
2.4.2	Factores . . . . .	16
2.4.3	Extracción de factores . . . . .	16
2.4.4	Rotación de factores . . . . .	16
2.4.5	Interpretación de los factores . . . . .	17
2.5	Diseño de encuestas . . . . .	17
2.5.1	Definición de preguntas . . . . .	17
2.5.2	Número de preguntas que deben hacerse . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Diseño del sistema de interacción robot-humano</b>	<b>19</b>
3.1	Requerimientos y especificaciones . . . . .	20
3.1.1	Requerimientos . . . . .	20
3.1.2	Rango de movimiento . . . . .	20
3.1.3	Especificaciones . . . . .	21
3.2	Acondicionamiento mecánico . . . . .	22
3.2.1	Estructura mecánica . . . . .	22
3.3	Diseño electrónico . . . . .	23
3.4	Ensamble de la plataforma experimental . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Implementación experimental</b>	<b>27</b>
4.1	Implementación de los controladores pHRI . . . . .	28
4.1.1	Sintonización de los controladores . . . . .	28
4.2	Máquina de estados para la operación del sistema . . . . .	29
4.3	Trayectoria con jerk mínimo . . . . .	30
4.3.1	Trayectoria deseada para el ejercicio . . . . .	30
4.4	Error de seguimiento como variable principal para la comparación . . . . .	32
4.5	Retroalimentación visual . . . . .	32
4.6	Interfaz gráfica de usuario (IGU) . . . . .	32

4.7	Preguntas realizadas . . . . .	35
4.8	Protocolo . . . . .	36
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>37</b>
5.1	Procesamiento de datos . . . . .	38
5.2	Análisis de factores exploratorio . . . . .	39
5.2.1	Análisis y discusión de los factores extraídos . . . . .	43
5.3	Resultado de los índices de desempeño . . . . .	44
5.4	Correlaciones relevantes . . . . .	45
5.5	Estudio paralelo convergente de los datos . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>55</b>
6.1	Conclusiones del trabajo . . . . .	55
6.2	Trabajo futuro . . . . .	57
	<b>Bibliografía</b>	<b>58</b>
	<b>Apéndice A Resultados preliminares</b>	<b>64</b>
	<b>Apéndice B Respuestas de la encuesta</b>	<b>70</b>
	<b>Apéndice C Índices de desempeño de los participantes</b>	<b>75</b>
	<b>Apéndice D Códigos de Matlab</b>	<b>79</b>
	<b>Apéndice E Circuitos electrónicos</b>	<b>85</b>

# Índice de figuras

2.1	Diagrama de bloques del sistema husillo-tuerca implementado . . . . .	10
2.2	Control de impedancia adaptable con estimación de movimiento [33]. . . . .	13
2.3	Modelo Maxwell de conexión en serie [34]. . . . .	14

## Índice de figuras

---

2.4	Metodología para realizar un análisis de factores. . . . .	15
3.1	Dimensiones antropométricas del brazo y antebrazo. . . . .	21
3.2	Sistema de transmisión lineal . . . . .	22
3.3	Base de la plataforma experimental. . . . .	23
3.4	Esquema general del sistema electrónico . . . . .	24
3.5	Estructura de la caja de control. . . . .	25
3.6	Plataforma experimental . . . . .	26
4.1	Esquema general de control . . . . .	28
4.2	Máquina de estados para el control del sistema. . . . .	30
4.3	Trayectoria deseada . . . . .	31
4.4	Condiciones durante la trayectoria deseada. . . . .	31
4.5	Elementos en la animación para retroalimentación visual . . . . .	33
4.6	Interfaz gráfica de usuario . . . . .	34
5.1	Población encuestada. . . . .	38
5.2	Individuo interactuando con el robot . . . . .	38
5.3	Media de percepción. . . . .	48
5.4	Media de desempeño. . . . .	48
5.5	Integral del error absoluto y media de percepción con el control de impedancia. . . . .	49
5.6	Integral del error absoluto y media de percepción con el control de admitancia. . . . .	50
5.7	Integral del error absoluto y media de percepción con el control Maxwell. . . . .	50
5.8	Participante 1. Max-Imp-Adm . . . . .	51
5.9	Participante 2. Max-Adm-Imp . . . . .	51
5.10	Participante 3. Imp-Max-Adm . . . . .	52
5.11	Participante 4. Adm-Imp-Max . . . . .	52
5.12	Cargas factoriales y media de fuerza aplicada. . . . .	53
A.1	Participante 1 - Admitancia adaptable . . . . .	65
A.2	Participante 1 - Impedancia adaptable . . . . .	65
A.3	Participante 2 - Admitancia adaptable . . . . .	66
A.4	Participante 2 - Impedancia adaptable . . . . .	66
A.5	Participante 3 - Admitancia adaptable . . . . .	67
A.6	Participante 3 - Impedancia adaptable . . . . .	67

A.7 Participante 4 - Admitancia adaptable . . . . .	68
A.8 Participante 4 - Impedancia adaptable . . . . .	68
A.9 Participante 5 - Admitancia adaptable . . . . .	69
A.10 Participante 5 - Impedancia adaptable . . . . .	69
E.1 Placa electrónica . . . . .	85
E.2 Configuración del integrado TL494. . . . .	86
E.3 Configuración de amplificadores operacionales para el sensor de fuerza. . . . .	86
E.4 Diagrama del puente H (VNH5016) . . . . .	86
E.5 Hoja de datos del circuito integrado TL494 . . . . .	87
E.6 Hoja de datos del circuito integrado AD620 . . . . .	88

# Índice de tablas

3.1 Especificaciones de la plataforma experimental . . . . .	22
3.2 Configuración de pines de la tarjeta de adquisición de datos para el control del sistema. . . . .	24
4.1 Valores de masa, amortiguamiento y rigidez usados. . . . .	29
4.2 Descripción de los elementos de la interfaz gráfica de usuario. . . . .	34
4.3 Preguntas de la encuesta aplicada. . . . .	35
4.4 Protocolo . . . . .	36
5.1 Matriz de correlación del control de impedancia . . . . .	39
5.2 Matriz de correlación del control de admitancia . . . . .	40
5.3 Matriz de correlación del control Maxwell . . . . .	40
5.4 Medidas de adecuación de muestra para el control de impedancia . . . . .	40
5.5 Medidas de adecuación de muestra para el control de admitancia . . . . .	41
5.6 Medidas de adecuación de muestra para el control Maxwell . . . . .	41
5.7 Matriz factorial (a) y factor rotado (b) para el control de impedancia . . . . .	41

## Índice de tablas

---

5.8	Matriz factorial (a) y factor rotado (b) para el control de admitancia . . . . .	42
5.9	Matriz factorial (a) y factor rotado (b) para el control Maxwell . . . . .	42
5.10	Comunalidades en cada controlador . . . . .	43
5.11	Medidas de tendencia central del error absoluto . . . . .	44
5.12	Medidas de tendencia central de la integral del error cuadrático . . . . .	44
5.13	Medidas de tendencia central de la integral temporal del error absoluto . . . . .	44
5.14	Medidas de tendencia central de la integral temporal del error cuadrático . . . . .	45
5.15	Correlaciones entre la media de respuestas e índices de desempeño individuales. El subíndice $i$ indica el número de participante (desde 1 hasta 150) y los subíndices $imp$ , $adm$ , $max$ indican a que controlador corresponden. . . . .	46
5.16	Medias generales de las respuestas y errores con cada controlador . . . . .	46
5.17	Correlaciones generales de las medias . . . . .	47

---

## Abreviaturas

---

EFA	Exploratory factor analysis.
pHRI	Physical Human-Robot Interaction.
PPR	Pulsos por revolución.
RBFNN	Radial Basis Function Neuronal Network.
IAE	Integral of the absolute magnitude of the error.
ISE	Integral of the square of the erro.
ITAE	Integral of time multiplied by the absolute value of error.
ITSE	Integral of time multiplied by the squared error.



---

## Notación

---

$\alpha$	Ganancia de actualización.
$A$	Avance de tuerca.
$B_d$	Amortiguamiento deseado.
$\epsilon_i$	Estimación del error.
$e$	Error.
$F_{int}$	Fuerzas internas.
$F_{int_k}$	Fuerzas internas asociadas a la rigidez.
$F_{int_k}$	Fuerzas internas asociadas al amortiguamiento.
$F_{ext}$	Fuerzas externas.
$F_h$	Fuerza del humano.
$F_{en}$	Fuerza de reacción del ambiente.
$i$	Índice, orden de polinomio/modelo.
$K_d$	Rigidez deseada.
$l_m$	Distancia de recorrido con jerk mínimo.
$M_d$	Masa deseada.
$n$	Numero de hilos en un tornillo.
$p$	Paso de rosca en un tornillo.
$r$	Entrada de RBFNN.
$r_s$	Coefficiente de correlación.
$S$	Vector de entradas $\mathbf{r}$ .
$t$	Tiempo.
$t_m$	Tiempo durante el recorrido con jerk mínimo.
$v_0$	Velocidad inicial.
$v$	Velocidad actual.
$W$	Función.
$x_0$	Posición inicial.

## *Notación*

---

$x$	Posición.
$X_d$	Posición deseada.
$X_p$	Posición del participante.
$X_m$	Desplazamiento lineal.
$\bar{R}_{imp_i}$	Media de las respuestas dadas de cada participante en el control de impedancia.
$\bar{R}_{adm_i}$	Media de las respuestas dadas de cada participante en el control de admitancia.
$\bar{R}_{max_i}$	Media de las respuestas dadas de cada participante en el control Maxwell.
$\bar{R}_t$	Media general o media de las medias individuales.
$\theta_m$	Desplazamiento angular.
$\hat{X}_{H_{d,i}}$	Intención de movimiento del humano.
$\delta\hat{F}$	Término de fuerza adaptable.
$\Delta F$	Diferencia entre la fuerza del humano y el ambiente.

---

# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

La interacción física robot-humano (pHRI por sus siglas en inglés) integra las virtudes de ambas partes durante tareas colaborativas con la intención de mejorar el desempeño general. Los robots son superiores en tareas que requieren precisión, fuerza y repetición; mientras que, la solución de problemas y adaptabilidad son elementos intrínsecos de la capacidad cognitiva humana.

Hoy en día, es común ver robots en numerosas áreas cumpliendo diversos roles, algunos ejemplos de pHRI se encuentran en campos como la medicina con el robot de cirugía Da Vinci [1], en rehabilitación con el robot MIT Manus [2] o en la industria de la manipulación y ensamblado de piezas [3]. Una relación estable del sistema acoplado humano-robot es una condición necesaria y compleja durante el diseño de controladores de interacción pues el manipulador no puede ser tratado como un sistema aislado, es necesario controlar no solo el movimiento sino las fuerzas de interacción entre ambos [4].

Las investigaciones realizadas al día de hoy pretenden realizar un control simultáneo movimiento-fuerza integrando al humano como parte del sistema, volviéndose difícil obtener un modelo dinámico del sistema completo. Diferentes enfoques se han usado para analizar este problema pero se pueden clasificar en dos principales, el control híbrido posición-fuerza y el control de impedancia, siendo este último el enfoque utilizado en esta tesis.

Con el control de impedancia definido por Hogan [4], se establece un nuevo objetivo, asemejar la habilidad humana con robots manipuladores, generando nuevos retos como asegurar la estabilidad del sistema acoplado y crear controles avanzados de impedancia.

## 1.1. Estado del arte

La interacción robot humano (HRI por sus siglas en inglés) cubre un rango amplio de aplicaciones. En las última décadas su investigación y desarrollo ha causado pasar de robots manipuladores en plantas industriales a robots personales en casa. Aun así, características como la seguridad y la adaptabilidad requieren de un constante desarrollo o actualización para lograr una mejor percepción de la robótica en sí.

Para tal propósito, es necesario la creación de robots con habilidades y características comparables con las de un humano. Aunque no exista una regla que justifique este hecho, está claro que el humano por naturaleza prefiere lo conocido y *"que es mas conocido para el hombre que él mismo"*, *Protágoras*.

Esta consideración ha llevado a dotar a los robots con mecanismos que simulen las articulaciones humanas, sensores que imiten los sentidos y algoritmos computacionales para generar inteligencia.

Con sistemas de captura de movimiento es posible medir los movimientos de un objeto en el espacio para diseñar así modelos cinemáticos y dinámicos. Por ejemplo en [5], Nakamura desarrolla algoritmos computacionales para modelar los músculos del cuerpo humano. Otro ejemplo se presenta en [6], donde Bobby L y sus colaboradores presentan el prototipo de una mano exoesquelética para aplicaciones espaciales.

Breazeal exploró teorías de psicología, evolución y desarrollo social para crear el robot Kismet con el fin de desarrollar interacción cognitiva entre el robot y el humano [7]. Demiris expone la idea de dotar a los robots con la capacidad de imitar acciones humanas para hacer más rápida la asignación de una tarea a un robot; esto mediante el estudio de infantes imitando y aprendiendo de su entorno [8]. Consecuentemente surge la idea de crear robots sociales que puedan interactuar con las personas de una manera interpersonal. Por ejemplo en [9] se desarrolla un robot para baile o en [10] donde presentan un robot para tocar música, solo por mencionar algunos. El desarrollo de este enfoque impulsa la creación de robots que se perciban naturales e intuitivos para el público en general.

Es evidente que la investigación de la interacción robot-humano es extensa e incluye diversos enfoques. El enfoque utilizado en esta tesis es la **interacción física robot-humano**; mediante el desarrollo de mecanismos y estrategias de control que superen las capacidades de los robot manipuladores usados hoy en día en la industria. Esta interacción se clasifica usualmente en interacción de apoyo, cooperativa y colaborativa; siendo esta última la utilizada en este trabajo.

La interacción física robot-humano debe considerar múltiples factores. Por una parte la seguridad, un robot que comparte el mismo espacio de trabajo con un humano debe ser capaz de detectar colisiones rápidamente y responder bajo criterios de seguridad ante ello. Por otro lado, la complejidad de diseñar un esquema de control que contenga al humano y sus incertidumbres como parte del sistema completo. Una primera guía general que cubre estos factores se propuso por Michael A. en [11] donde resalta la importancia de crear sistemas autónomos tolerantes y eficientes.

### **Controles de complianza**

El control de complianza, como se le llama generalmente a la estrategia para el control simultáneo de fuerza y movimiento [12], empezó en los años 70's con la intención de mejorar operaciones automáticas de ensamblado, pintura y *pick and place*.

El uso de manipuladores estaba evolucionando así como la necesidad de tener mayor precisión en tareas de ensamblado complejo con múltiples piezas, por lo que un control de posición no sería suficiente por la falta de retroalimentación del efector final sobre su entorno que lo vuelve poco fiable para cualquier tarea de manipulación y, por lo tanto, “es mejor especificar la fuerza que debe mantenerse normal a la superficie de contacto” [13].

Entre las primeras estrategias de control para solucionar este problema se encuentra el control híbrido posición/fuerza [13] el cual pretende dar solución a tres problema concretos:

- Control de posición de un manipulador en direcciones donde existe una restricción natural de fuerza.
- Control de fuerza de un manipulador en direcciones donde exista una restricción natural de posición.
- Un esquema para implementar la combinación de los puntos anteriores en cualquier grado de libertad con un marco de referencia arbitrario.

El comportamiento de este controlador se observó después en experimentos como el desarrollado en [14], donde un brazo manipulador tipo Scheinman Stanford es comandado para hacer contacto con una superficie rígida y movable que induce perturbaciones al manipulador.

A pesar de las ventajas del controlador híbrido posición/fuerza, la falta de control sobre la dinámica de interacción entre el manipulador y su ambiente sigue presente. Es así como surge la idea de imitar el comportamiento humano mediante elementos artificiales, es decir, que los manipuladores encargados de realizar tareas específicas reaccionen e interactúen con su entorno como lo haría un humano.

Observando el comportamiento del sistema motriz humano, Hogan destaca la habilidad del sistema nervioso central de ajustar la impedancia muscular dependiendo del ambiente con el que este interactuando. Plantea que el brazo humano puede ser aproximado por un modelo masa-resorte-amortiguador y que esta habilidad de impedancia ajustable se puede integrar en los robots manipuladores [15]. El concepto es aplicado a la robótica de manipulación, planteando una relación dinámica entre las variables de movimiento del manipulador y las fuerzas de contacto.

Es así como la investigación de la robótica de interacción se ha enfocado en desarrollar controles de impedancia avanzados, así como en combinar algoritmos y esquemas de control para obtener un desempeño deseado durante la interacción.

Por ejemplo, Seraji propone en [16] dos esquemas de control para hacer seguimiento de fuerza usando control de impedancia. En [17] Christian Ott propone un nuevo tipo de control de impedancia para articulaciones flexibles con el fin de incrementar la flexibilidad durante la manipulación. En suma se desarrollan controladores de impedancia auto ajustables ante diferentes ambientes con algoritmos de aprendizaje [18], [19], [20].

Actualmente, la aplicación de los controladores de interacción robot-humano basados en impedancia incluye robots de rehabilitación [21], robots colaborativos (COBOTS) [22], robots industriales [23], entre otros.

El desarrollo de cualquier modo de control para la interacción física robot-humano son concurrentes y variadas. En [24], se diseñó un robot de rehabilitación para personas con problemas neuro-musculares que; en conjunto con un control híbrido posición-fuerza basado en lógica difusa, pretende dar solución a las no linealidades introducidas al sistema por el humano. Aunque sus resultados mostraron que el robot puede guiar al humano por una trayectoria deseada a pesar de las perturbaciones externas, la percepción del paciente sobre el robot es desconocida. Un nuevo control denominado control de admitancia de orden fraccionario se desarrolla en [25], con el fin de asegurar la estabilidad del sistema con el humano como parte del lazo de control. También, se hace la comparación de este control con uno de admitancia de orden completo con el fin de demostrar las ventajas del control propuesto. Sus resultados indican que el control fraccionario es más robusto ante

frecuencias altas pues el amortiguamiento efectivo incrementa proporcionalmente, además que esta característica no interviene a bajas frecuencias que es cuando el control esperado toma lugar. La mayoría de los resultados se han obtenido mediante un enfoque cuantitativo considerando criterios de estabilidad, factores de amortiguamiento o análisis de frecuencias.

En [26] se utilizó un U-test, técnica estadística para datos no paramétricos, para conocer la evaluación cualitativa dada por el humano, del cual los controles propuestos resultaron con calificaciones más altas que los controles convencionales. Sin embargo, la comparación no resultó con relevancia estadística. El estado del arte de comparación entre controladores de interacción robot-humano que enfatizan la percepción humana no es amplio. El trabajo de Ming Saung [26] es uno de los pocos que apunta a este cometido. Para el control de una prótesis de mano se proponen tres controladores híbridos fuerza-velocidad basados en modos deslizantes, backstepping y la combinación de estos, que son comparados entre sí y con controles de fuerza a lazo abierto.

Por su parte [27], presenta una discusión amplia del control de impedancia, donde enfatiza la comparación de conceptos, técnicas, estrategias y aplicaciones que involucran control de impedancia. Partiendo de los conceptos teóricos, explica el diseño de los parámetros de impedancia y los requerimientos para la implementación de diferentes estrategias de control basadas en impedancia. De este desarrollo hace la comparación no solo a nivel teórico, también a nivel de hardware y software, ampliando así las posibles consideraciones a tener en cuenta al momento de elegir un modo de control.

Además, Yue Hu realizó un estudio exploratorio sobre los factores que involucra la interacción física robot-humano [28]. Su objetivo es identificar factores de interacción que puedan medir para ser usados en controles pHRI, mediante el monitoreo y análisis del estado de un usuario durante la interacción. Diseñó un experimento donde el usuario interactúa con el robot durante un juego de rompecabezas. Se recolectaron datos de los sensores incluidos en un robot de siete grados de libertad. También, se utilizaron dos cuestionarios (CH-33 y GSQ) para conocer la percepción del usuario sobre el robot y un cuestionario de personalidad previo a los experimentos. Del análisis estadístico de estos datos se extraen los factores más relevantes y con estos se hacen correlaciones de Spearman [29] para identificar relaciones entre la percepción, la personalidad y las medidas recolectadas por los sensores.

## **1.2. Motivación y justificación**

En definitiva la interacción física robot-humano se ha vuelto una disciplina dentro de la robótica con múltiples aplicaciones y desarrollo constante para lograr interacciones óptimas y seguras. Ante el planteamiento de objetivos surgieron varios cuestionamientos ante su implementación como qué características debe tener el controlador para cumplir con estos objetivos, que técnicas usar para medir el desempeño del controlador durante la interacción y cómo es posible incluir la percepción humana dentro del análisis para llegar a una conclusión.

En este trabajo de tesis se parte de estas preguntas para hacer la implementación de 5 controladores de interacción robot-humano en un robot de rehabilitación de un grado de libertad y hacer una comparación entre ellos desde dos enfoques distintos. De forma cuantitativa calculando índices de desempeño de cada controlador durante la interacción. Y por otro lado de forma cualitativa mediante la aplicación de una encuesta a la población convocada que, mediante el uso de técnicas estadísticas como el análisis de factores, se hizo un análisis cuantitativo para aislar la percepción humana sobre el controlador.

## **1.3. Objetivo principal**

Comparar el desempeño de controladores de interacción robot-humano en un robot de un grado de libertad, desde un enfoque cuantitativo, mediante las mediciones de los errores, y otro cuantitativo, mediante la aplicación de encuestas y análisis factorial para conocer la percepción humana.

## **1.4. Objetivos particulares**

- Acondicionar un robot de rehabilitación de un grado de libertad para realizar ejercicios activos.
- Diseñar y construir de un sistema electrónico para el acondicionamiento de las señales de control.
- Elaborar un código en Simulink que controla el sistema a través de una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments.

- Implementar cinco controladores pHRI en el robot.
- Diseñar una interfaz gráfica de usuario que permite seleccionar y configurar cada modo de control, además de presentar al usuario una animación del objetivo a seguir.
- Diseñar y aplicar una encuesta como instrumento de evaluación para conocer la percepción de los usuarios en la interacción con el robot.
- Obtener los índices de desempeño de cada usuario con cada controlador.
- Analizar mediante análisis de factores exploratorio las respuestas recabadas.
- Determinar la relación estadística entre los índices de desempeño y el resultado del análisis de factores.

### **1.5. Organización del documento**

En Capítulo 1 se presenta la introducción al trabajo realizado durante el proyecto de tesis, se menciona la motivación, objetivos y estado del arte para la interacción física robot-humano. En el Capítulo 2 se aborda el concepto de impedancia mecánica describiendo formalmente sus características así como las de los controladores basados en impedancias implementados en esta tesis. Se incluyen conceptos de ingeniería para la implementación de los controladores. También se explica el diseño de la encuesta y se enuncian parámetros generales para realizar un análisis de factores exploratorio. En el Capítulo 3 se detalla el diseño del sistema de interacción robot-humano con el robot de un grado de libertad. Además, se abordan los requerimientos y acondicionamiento mecánico así como el diseño electrónico. En el Capítulo 4 se presentan los procedimientos experimentales para lograr la comparación de los controladores. Se explica el diseño de una máquina de estados para la implementación de los controles. También, se describe la interfaz gráfica de usuario, la trayectoria deseada para el ejercicio que harán los participantes, el diseño de la encuesta que se les aplicó y finalmente se incluye el protocolo seguido durante la etapa de pruebas. En el Capítulo 5 se incluyen los resultados obtenidos a partir del análisis de factores exploratorio a las encuestas realizadas. Dichos resultados se presentan de forma individual por cada modo de control. Asimismo, como resultado se incluye la media de los índices de desempeño por cada controlador y su respectivo análisis estadístico de su relación con el resultado obtenido en el análisis. Finalmente, en el Capítulo 6 están las conclusiones y posibles trabajos a futuro que se pueden realizar a partir de este trabajo de tesis.

---

## CAPÍTULO 2

---

### Marco teórico

---

Se presentan los elementos necesarios para la implementación de una plataforma para pruebas de interacción física robot-humano. Se detallan los modelos de control a implementar y sus características. También se abordan los parámetros necesarios (previos y posteriores) para hacer un análisis de factores exploratorio. Y finalmente se incluye el diseño utilizado para el instrumento de evaluación (encuesta).

## 2.1. Mecanismos y dispositivos relevantes

### 2.1.1. Mecanismo husillo-tuerca para movimiento traslacional

El mecanismo de husillo-tuerca transforma el movimiento circular en desplazamiento lineal. El husillo se caracteriza por el número de hilos  $n$  y por el paso de la rosca  $p$ . Por lo que el avance de la tuerca esta dado por la siguiente ecuación:

$$A = pn \quad (2.1)$$

En la figura 2.1 se puede apreciar el diagrama de bloques que describe la implementación de este mecanismo en el robot utilizado en el presente trabajo.

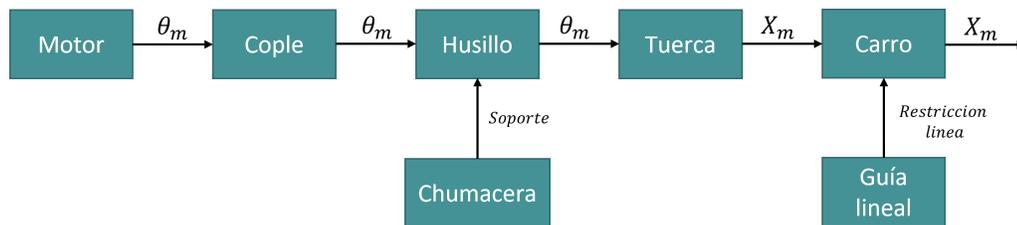


Figura 2.1: Diagrama de bloques del sistema husillo-tuerca implementado

### 2.1.2. Encoder incremental

Un encoder incremental es un dispositivo electro-mecánico rotativo que genera un número predeterminado de pulsos por unidad de desplazamiento en dos canales (A y B usualmente) con un desfase de  $90^\circ$  entre ellos. Estos pulsos en binario son proporcionales a la rotación generada en el eje, con el desfase es posible conocer la dirección de giro y con los pulsos por revolución (PPR) se puede calcular la posición del eje.

### 2.1.3. Celda de carga

La celda de carga es un transductor que convierte fuerza en una salida eléctrica. Está hecha de un metal que se deforma al aplicarle fuerza, que a su vez contiene galgas extensiométricas conectadas en configuración de puente de Wheatstone. Con esta configuración es posible medir el cambio en las resistencias debido a la deformación de la celda y calcular la fuerza aplicada.

## 2.2. Conceptos y principios de los controles implementados

### 2.2.1. Control de impedancia

Se define impedancia como la relación entre el flujo de entrada  $S_f$  y el esfuerzo de salida  $S_e$  [4]. En un manipulador los términos de impedancia están dados por las siguientes ecuaciones:

$$F_{int_k} = K_d[x_0 - x] \quad (2.2)$$

$$F_{int_b} = B_d[v_0 - v] \quad (2.3)$$

$$M_d \frac{dV}{dt} = F_{ext} + F_{int_k} + F_{int_b} \quad (2.4)$$

Las ecuaciones (2.2) y (2.3) son las impedancias dependientes de la posición y velocidad respectivamente. La ecuación (2.4) representa la fuerza del manipulador que involucra los efectos de la inercia.

Sustituyendo las ecuaciones (2.2) y (2.3) en (2.4), la ecuación (2.4) se reescribe de forma general como:

$$M_d(\ddot{x} - \ddot{x}_0) + B_d(\dot{x} - \dot{x}_0) + K_d(x - x_0) = F_{ext} \quad (2.5)$$

Con la ecuación (2.5) se define una impedancia deseada con los valores de  $M_d$ ,  $B_d$  y  $K_d$  para la interacción, lo que resulta en una trayectoria virtual la cual se usa como referencia para determinar la fuerza proporcional al error entre la posición actual y la trayectoria virtual, manteniendo así la impedancia y por lo tanto la interacción deseada. En el caso que no exista interacción o esta se considere nula, la trayectoria actual se aproxima a la trayectoria virtual.

### 2.2.2. Control de admitancia

De la causalidad de la relación de esfuerzo y flujo en sistemas físicos, Hogan define dos conceptos opuestos: impedancia que se definió anteriormente; y admitancia, donde el esfuerzo es la entrada y el movimiento es la salida.

El modelo de admitancia presentado en [30] define esta relación como:

$$\ddot{x} = \frac{F_{ext} - B_d \dot{x}}{M_d} \quad (2.6)$$

donde el término de amortiguamiento  $B_d$  es el factor principal respecto a la velocidad que afecta la percepción del humano. Además, la relación inversa entre la aceleración y la masa indica que masas pequeñas implican una respuesta rápida aunque posiblemente inestable.

### 2.2.3. Control de admitancia adaptable

En [31], se propone un control de admitancia adaptable a ambientes móviles con el fin de variar simultáneamente el amortiguamiento de interacción entre el manipulador, el humano y un ambiente móvil.

El control propuesto está dado por:

$$M_d(t)\ddot{x}_d + B_d(t)\dot{x}_d = \Delta F - \delta\hat{F} \quad (2.7)$$

$$B_d(t) = B_0 - \alpha|F_h| > 0 \quad (2.8)$$

donde  $M_d$  es una inercia deseada,  $B_0$  es el valor de amortiguamiento inicial de  $B_d(t)$  y  $\alpha$  es la ganancia de actualización de  $B_d(t)$ . El término adaptable  $\delta\hat{F}$  está definido como:

$$\delta\hat{F} = \hat{\lambda}(t)\dot{x}_d \quad (2.9)$$

$$\hat{\lambda}(t) = \eta|F_{en}| > 0 \quad (2.10)$$

con  $\eta$  definida como una ganancia positiva. De esta manera el término adaptable responde atenuando las incertidumbres del ambiente mientras que el humano experimenta la fuerza de la admitancia variable.

### 2.2.4. Control de impedancia adaptable basado en estimación de movimiento

Yanan Li y Shuzi Sam parten del problema de obtener un modelo dinámico del brazo humano para emplear redes neuronales que estimen su movimiento y así integrarlo a un control de impedancia adaptable [32]. La figura 2.2 muestra el diagrama de bloques del control propuesto por Li & Sam. Este contiene el modelo de control de impedancia, descrito previamente, y la estimación del movimiento es calculada con la ecuación (2.11) usando una red neuronal de función radial (RBFNN por sus siglas en inglés).

$$x_{\hat{H}d,i} = \hat{W}_i^T S_i(r_i) + \epsilon_i \quad (2.11)$$

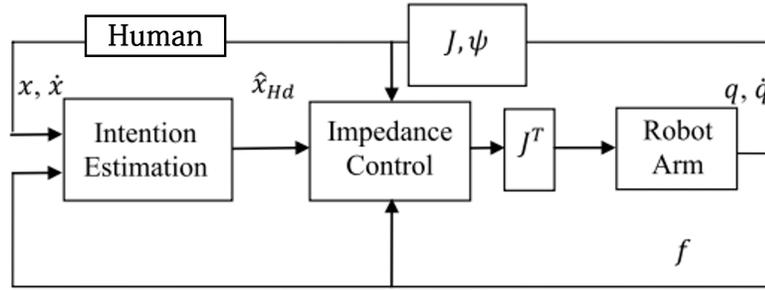


Figura 2.2: Control de impedancia adaptable con estimación de movimiento [33].

### 2.2.5. Control de complianza basado en el modelo Maxwell

El control propuesto en [33], propone una alternativa al modelo convencional masa-resorte-amortiguador conectado en paralelo que de hecho es el modelo del control de impedancia tradicional. El modelo Maxwell presenta estos elementos conectados en serie (figura 2.3) para generar una deformación plástica que descarta la fuerza de retroceso generada por el modelo convencional y por lo tanto la posición inicial puede cambiar en cualquier instante, la ecuación que describe dicho modelo esta dada por:

$$M_d \ddot{x} + K_d B_d^{-1} M_d \dot{x} + K_d x = F_{ext} + K_d B_d^{-1} \int F_{ext} dt \quad (2.12)$$

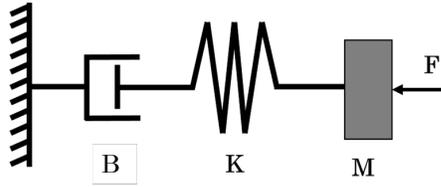


Figura 2.3: Modelo Maxwell de conexión en serie [34].

### 2.3. Índices de desempeño

Los esquemas de control requieren de criterios o métricas para evaluar su desempeño. El error, en qué instante y cuánto tiempo duró son factores importantes a considerar para esta evaluación [34]. Los índices de desempeño que se presentan a continuación hacen énfasis en estos factores calculando una media individual del desempeño del humano al realizar un ejercicio con el robot.

- Integral del error absoluto (IAE por sus siglas en inglés)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.13)$$

- Integral del error cuadrático (ISE por sus siglas en inglés)

$$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (2.14)$$

- Integral temporal del error absoluto (ITAE por sus siglas en inglés)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (2.15)$$

- Integral temporal del error cuadrático (ITSE por sus siglas en inglés)

$$ITSE = \int_0^{\infty} te(t)^2 dt \quad (2.16)$$

Hasta ahora, se ha mencionado el uso de los índices de desempeño para evaluar los controladores implementados. En la siguiente sección se introduce el análisis de factores exploratorio como técnica estadística para segmentar y conocer la evaluación de los participantes de los controladores durante su interacción con el robot.

## 2.4. Análisis de factores

El análisis de factores es una técnica de reducción de dimensión de datos. El objetivo es buscar grupos de correlaciones dentro de un conjunto grande de variables para así extraer un número mínimo de factores capaces de explicar el máximo de información contenida en los datos [35].

En esta sección se presentan conceptos clave para realizar un análisis de factores siguiendo un esquema general tal como se muestra en la figura 2.4; así como algunas consideraciones previas al análisis.

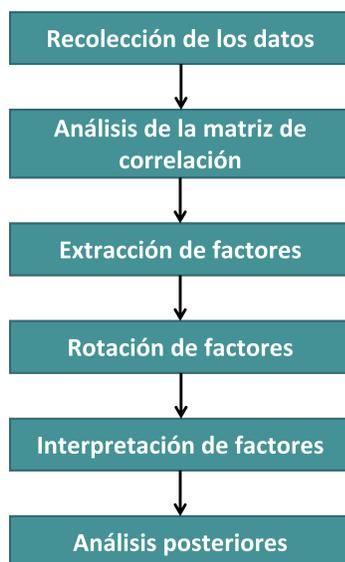


Figura 2.4: Metodología para realizar un análisis de factores.

### 2.4.1. Análisis de factores exploratorio y confirmatorio

Existen dos enfoques principales a la hora de hacer un análisis de factores: exploratorio y confirmatorio. El análisis de factores exploratorio se utiliza en las primeras etapas de una investigación cuando no se tiene conocimiento de las posibles correlaciones entre variables. Por otro lado, el análisis de factores confirmatorio se usa en una etapa posterior para confirmar hipótesis o teorías sugeridas sobre los datos de estudio.

Ya que en esta tesis se hace la comparación entre controles pHRI haciendo énfasis en la percepción humana, se utilizó un análisis de factores exploratorio ya que no se planteó

alguna hipótesis preliminar, sólo fueron considerados los objetivos, dentro de los cuales se definió encontrar factores que incrementen el conocimiento en la interacción robot-humano.

#### **2.4.2. Factores**

Las correlaciones entre variables se pueden agrupar en lo que se conoce como matriz de correlaciones. Las entradas de la diagonal principal valen uno pues cada variable se correlaciona perfectamente consigo misma. Los valores que interesan son los que están fuera de la diagonal principal pues la existencia de grupos con coeficientes altos de correlación entre subconjuntos de variables sugiere que esas variables podrían estar midiendo aspectos de la misma dimensión subyacente.

Estas dimensiones subyacentes se conocen como factores o variables latentes.

#### **2.4.3. Extracción de factores**

La extracción de factores consiste en determinar un número mínimo de factores que expliquen el máximo de covarianza común de los datos. Algunos de los métodos más comunes para realizar la extracción son:

- Método de componentes principales.
- Método de los ejes principales.
- Método de la máxima verosimilitud.
- Método de mínimos cuadrados.

La elección del método de extracción es libre y depende de la naturaleza de los datos. El estudio presentado en [36], sugiere que si los datos siguen una distribución normal, el método de máxima verosimilitud extraerá factores con mayor significado estadístico. Por otro lado, si se observa normalidad multivariada, métodos como extracción por ejes principales obtendrán mejores resultados.

#### **2.4.4. Rotación de factores**

Una vez extraídos los factores, también se agrupan las variables que lo representan. El peso inicial de estas variables puede hacer difícil la interpretación de los resultados por lo que se opta por rotar los factores para obtener patrones de pesos que clarifiquen su estructura.

Hay dos enfoques principales para hacer la rotación: rotaciones ortogonales y rotaciones oblicuas. Aunque ambos enfoques tienden a presentar resultados parecidos, es importante notar sus diferencias. Los resultados de la rotación ortogonal son fáciles de interpretar y reportar, aunque se debe asumir que los factores extraídos no están relacionados. Usando una rotación oblicua se asume que los factores están relacionados pero su interpretación es compleja [37].

#### **2.4.5. Interpretación de los factores**

Finalmente la interpretación de los factores se basa en las correlaciones estimadas con las variables originales. En esta etapa del análisis se hacen las siguientes aclaraciones

- Se identifican las variables con mayor peso de cada factor.
- Se define el nombre del factor considerando las posibles causas que generaron los patrones obtenidos por el análisis.

Después de haber definido los aspectos necesarios para el análisis de factores exploratorio, se presentan a continuación aspectos requeridos para el diseño de encuestas.

### **2.5. Diseño de encuestas**

La teoría detrás del diseño de encuestas suele ser contradictoria y difícil de sintetizar, sin embargo, existen consideraciones comunes que se deben tomar en cuenta al momento de realizar encuestas

- Definir la pregunta
- ¿Cuántas preguntas deben hacerse?
- ¿Cómo ejecutar la encuesta?

#### **2.5.1. Definición de preguntas**

Al definir una pregunta, Kahane [38] presenta una discusión sobre los criterios a considerar. Argumenta que la pregunta debe ser específica, alcanzable de contestar y no ser ambigua; debe establecer la propiedad esencial que se quiere medir y aclarar el contexto donde se aplica. Además, una guía para la construcción de una pregunta se presenta en [39] donde se especifican elementos básicos que debe contener la pregunta

1. El sujeto que contesta.
2. El objeto de estudio.
3. El atributo que se califica.

Todas estas consideraciones son tomadas en cuentas posteriormente cuando se diseñan las preguntas y se define la encuesta en los Capítulos 4 y 5.

### **2.5.2. Número de preguntas que deben hacerse**

Ya que en esta tesis se hace uso de un análisis de factores, es necesario considerar los criterios discutidos en los antecedentes del diseño de encuestas y del tamaño de muestra para que un análisis de factores sea viable.

El enfoque usado en esta tesis es la relación sujeto-variable (STV por sus siglas en inglés) que puede ser usado para determinar el tamaño de la muestra [40]. Aunque existen diversas opiniones sobre cómo debe ser esta relación, la media indica que no debe ser menor que 5:1, es decir, 5 sujetos por pregunta realizada.

Además, es importante notar que muestras muy grandes tienden a sabotear el resultado de un análisis de factores. Esto implica que se debe contar con la muestra suficiente que justifique el uso de dicho análisis [41].

---

## CAPÍTULO 3

---

# Diseño del sistema de interacción robot-humano

---

El contenido de este Capítulo esta dirigido a mostrar los requerimientos que debe tener la plataforma experimental, se menciona cómo fue acondicionado el robot de un grado de libertad así como los circuitos electrónicos que permiten el filtrado, recepción y envío de datos.

## **3.1. Requerimientos y especificaciones**

### **3.1.1. Requerimientos**

La plataforma experimental debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Ofrecer opciones de controladores para elegir.
- Estar acondicionada para personas de diferentes estaturas para abarcar a la mayoría de los participantes.
- La plataforma debe contar con interfaces de hardware de entrada y salida que le permita interactuar con el usuario.
- Contar con interfaz gráfica de usuario (IGU).
- La IGU debe permitir al operador: elegir el modo de control, ajustar sus ganancias; configurar la velocidad y distancia de recorrido del ejercicio.
- La IGU debe dar indicaciones al participante del movimiento que debe ejecutar durante el ejercicio y proporcionar retroalimentación visual del movimiento que está ejecutando.
- La plataforma debe incluir con un sistema de paro de emergencia.
- La plataforma debe guardar los datos que permitan evaluar el desempeño del participante.

### **3.1.2. Rango de movimiento**

El cálculo del rango de movimiento se hizo con base en las dimensiones antropométricas de la población donde será probada la plataforma experimental (Ciudad de México). El libro de dimensiones antropométricas de la población latinoamericana [42], especifica que las longitudes del brazo ( $a$ ) y el antebrazo ( $b$ ), para los trabajadores en la zona metropolitana de la Ciudad de México, son 0.329 m y 0.368 m respectivamente. Aunque los datos tomados pertenecen a una muestra de 974 individuos, son útiles como referencia para el diseño.

La figura 3.1 muestra un esquema de las dimensiones antropométricas mencionadas, el rango de movimiento ( $c$ ), el alcance frontal ( $a+b$ ) y el ángulo de inclinación de movimiento

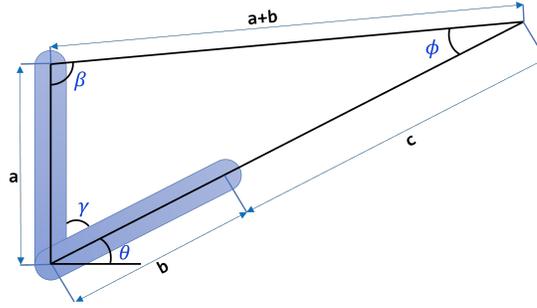


Figura 3.1: Dimensiones antropométricas del brazo y antebrazo.

de alcance ( $\theta$ ). Usando la ley de cosenos se calcula el valor de  $c$

$$c = \sqrt{(a+b)^2 + a^2 - 2a(a+b)\cos(\beta)} - b \quad (3.1)$$

$$\beta = 180 - \gamma - \phi \quad (3.2)$$

$$\phi = \sin^{-1} \left( \frac{a}{a+b} \sin(\gamma) \right) \quad (3.3)$$

$$\gamma = 90 - \theta \quad (3.4)$$

Resolviendo las ecuaciones (3.1)-(3.4) se obtiene el rango de movimiento  $c = 0.43m$

### 3.1.3. Especificaciones

La tabla 3.1 muestra las especificaciones que tiene la plataforma experimental con la que se cuenta.

En la figura 3.2 se ilustra la estructura mecánica del sistema de transmisión por husillo de bolas con la que interactuarán los participantes. El movimiento lineal se transmite a través de un husillo de bolas (1). La potencia es transmitida al sistema por el motor (2) usando un cople flexible (3), para unir la flecha del motor con el husillo y compensar alguna desalineación. El husillo de bolas está soportado por dos chumaceras de piso (4) y sobre él, está el carro del sistema (5), compuesto principalmente por el maneral (6) y la celda de carga (7).

En cuanto al resto de sensores, se tiene un encoder incremental (8) al final del husillo para medir la posición del carro. También, se cuenta con dos sensores de límite (9) para limitar el rango de movimiento y evitar colisiones entre el carro y el resto de la estructura, además sirven para establecer la posición cero (home) del sistema.

Tabla 3.1: Especificaciones de la plataforma experimental

Descripción	Detalle
Tipo de movimiento.	Lineal.
Rango de movimiento.	0.43m.
Velocidad máxima.	0.1 m/s.
Peso.	25 kg.
Efecto final	Empuñadura de aluminio con diámetro de 50 mm.
Fuerza máxima sobre el efecto final	396 N.
Transmisión	Husillo de bolas, D=16 mm y l=4 mm.
Actuador	Motor de CD, 130 V (SPECO CM34D25NZ85B) 1/8 HP, 250 RPM, 1 A.
Retroalimentación	Encoder óptico incremental, 5200 pulsos/revolución, (US DIGITAL HBM6)

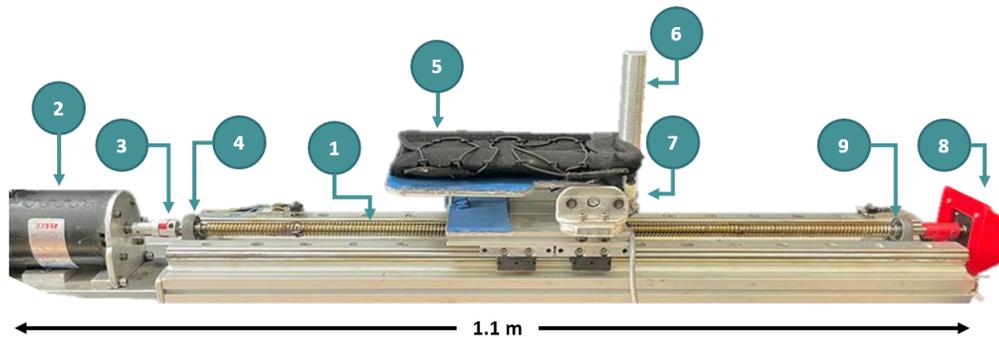


Figura 3.2: Sistema de transmisión lineal

## 3.2. Acondicionamiento mecánico

En esta sección se presenta la estructura mecánica que se acopló al sistema de transmisión lineal para finalizar con el proceso de diseño de la plataforma experimental.

### 3.2.1. Estructura mecánica

Con base en las medidas antropométricas obtenidas en [42] se diseñó y construyó la estructura mostrada en la figura 3.3.

La estructura debe cumplir con las siguientes especificaciones:

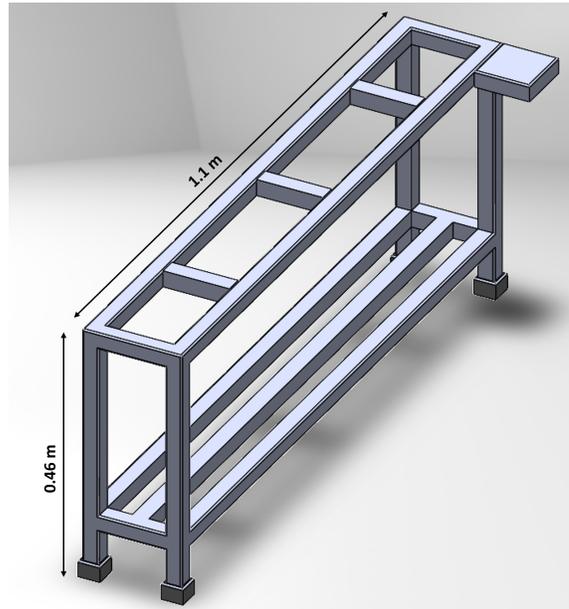


Figura 3.3: Base de la plataforma experimental.

- Soportar el sistema de transmisión lineal sin ningún tipo de holgura.
- La base debe contar con un soporte para sujetar un monitor que mostrará la IGU
- En conjunto con el sistema de transmisión lineal, la altura debe coincidir con la medida antropométrica de un individuo sentado a un lado de la plataforma experimental. ( $l = 0.53m$ ).

### 3.3. Diseño electrónico

En la figura 3.4 se puede observar el esquema general del sistema electrónico de la plataforma experimental. El sistema electrónico está compuesto por una tarjeta de adquisición de datos, un circuito para el control del motor, un circuito para el acondicionamiento y amplificación de la señal del sensor de fuerza, una fuente de alimentación y un regulador conectado a la misma que alimenta los circuitos mencionados. Los diagramas de conexión así como las especificaciones de los componentes se encuentran en el *Apéndice E* (circuitos electrónicos). Estos elementos se encuentran dentro de la caja de control, mientras que los elementos que se presentan fuera de esta son los sensores montados sobre la plataforma, el

motor CD y la estación de trabajo. La tarjeta utilizada es una NI PCI-6251. La tabla 3.2 muestra la descripción de los pines utilizados y su función.

Los pines 37 y 45 adquieren las señales A y B del encoder respectivamente. Los pines 17 y 52 son entradas digitales que mediante los sensores de final de carrera detectan si se ha llegado al límite del rango de movimiento. El pin 33 lee la señal amplificada del sensor de fuerza que puede tomar valores positivos o negativos dependiendo del sentido de aplicación. Finalmente, el pin 22 es la salida analógica que envía la señal de control al circuito controlador del motor.

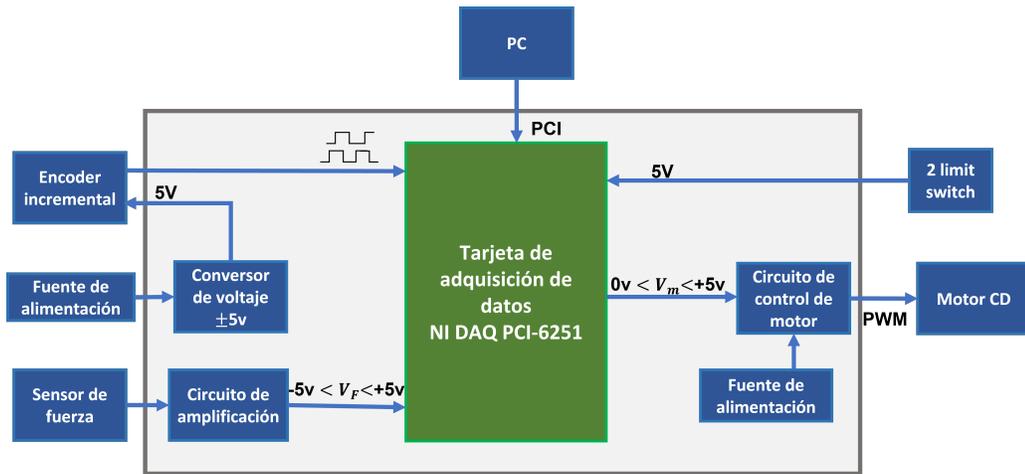


Figura 3.4: Esquema general del sistema electrónico

Tabla 3.2: Configuración de pines de la tarjeta de adquisición de datos para el control del sistema.

Pin	Descripción	Función
37	Contadores del canal 1	Lectura del encoder
45		
35	Referencia a tierra de puertos digitales	Unión entre tierras de la DAQ y los circuitos adicionales
33	Entrada analógica AI 1	Lectura del sensor de fuerza
22	Salida analógica AO 1	Envío de la señal de control del motor
17	Puerto digital P0.0	Lectura del limit swich 1
52	Puerto digital P0.1	Lectura del limit swich 2

### 3.4. Ensamble de la plataforma experimental

En la figura 3.6 se puede apreciar la plataforma experimental ensamblada. Se observa la caja de control que contiene los circuitos electrónicos; el sistema de transmisión lineal acoplado a la base y equipo de hardware para la interacción con el operador.

En la figura 3.5a se observan los cables de comunicación y alimentación de todos los sensores empleados (2), el cable de comunicación con la DAQ (1) y el cable de alimentación monofásica (3). Mientras que en la figura 3.5b se muestra el interior de la caja de control, contiene la fuente de alimentación (4), el bloque conector para la comunicación con la DAQ (5) y los circuitos electrónicos para acondicionamiento, envío y recepción de datos (6).

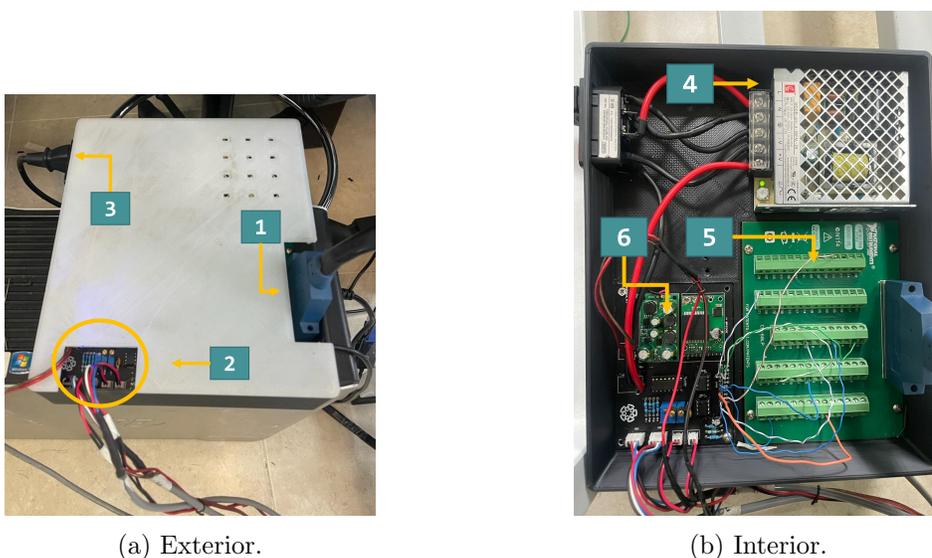


Figura 3.5: Estructura de la caja de control.



Figura 3.6: Plataforma experimental

---

## CAPÍTULO 4

---

# Implementación experimental

---

Los 5 modelos de control presentados en el Capitulo 2, fueron implementados y probados por un grupo piloto de 5 personas. Durante estos experimentos, los participantes evaluaron cualitativamente los 5 controladores, y se obtuvieron las gráficas de desempeño paralelamente. Se determino que el control de impedancia adaptable, presentado en la sección 2.2.4, no era percibido diferente al control basado en el modelo Maxwell, cualidad que se observa con las gráficas mostradas en el *Apéndice A*. De igual manera, el control de admitancia adaptable de la sección 2.2.3, no presento discrepancias significativas con el control de admitancia no adaptable. Por otro lado, se observó que, al probar ininterrumpidamente los 5 controladores, los participantes tendían a olvidar su percepción sobre alguno de los estos y presentar cansancio en las ultimas repeticiones. Con base en estas consideraciones, y con el fin de realizar un estudio objetivo, estos controladores (impedancia adaptable y admitancia adaptable) no fueron presentados a la población objetivo, y por lo tanto, omitidos del análisis estadístico que se realiza más adelante.

## 4.1. Implementación de los controladores pHRI

A continuación, en la figura (4.1), se muestra el esquema de control empleado para la comparación entre controladores. El esquema está compuesto por un lazo interno de control PID de posición, un conmutador, una retroalimentación visual y el humano como parte del lazo de control.

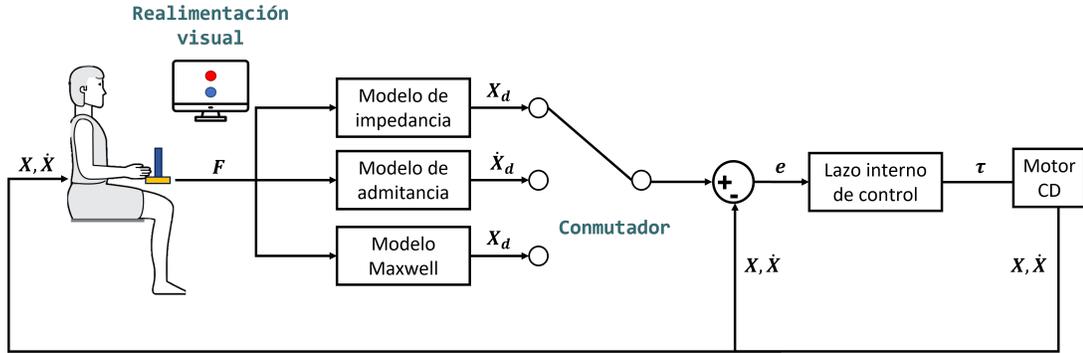


Figura 4.1: Esquema general de control

Las variables que conforman el error  $e$  se generan con base en el modelo seleccionado:  $e = X_d - X$  en el caso de los controles de impedancia y Maxwell;  $e = \dot{X}_d - \dot{X}$  para el control de admitancia. La señal de control correspondiente es percibida por el humano que responde en consecuencia para alcanzar el objetivo según lo ve en la retroalimentación visual.

### 4.1.1. Sintonización de los controladores

Como se observó en la sección 2.2, la interacción puede ser modificada a partir de los parámetros  $M_d$ ,  $B_d$  y  $K_d$ . Los valores de estos parámetros dependen de la naturaleza de la interacción y de los objetivos buscados durante la misma. Por ejemplo, en [43] se presenta un sistema con comportamiento de robot ajustable para ayudar al operador humano a realizar una determinada tarea con demandas mínimas de carga de trabajo. Se asignan cualitativamente valores de  $M_d = 50$ ,  $B_d = 50$  y  $K_d = 0$ , que posteriormente se actualizan mediante pruebas y algoritmos de optimización. Un método de adaptación de roles para el control compartido humano-robot es desarrollado en [44]. El modelo de impedancia es usado como parte de este método, los valores  $M_d = 1$ ,  $B_d = 5$  y  $K_d = 0$  son usados en un

primer experimento como punto de partida y actualizados en un segundo experimento con base en los resultados del primero y los deseados para el segundo.

Puesto que, el objetivo de esta tesis es hacer la comparación entre controladores, se utilizaron valores de  $M_d$ ,  $B_d$  y  $K_d$  idénticos en cada control. De esta forma nos aseguramos que la comparación realizada sea equitativa, es decir, que ninguno de los controladores presente ventajas o desventajas además de las presentes intrínsecamente en su modelo. Se realizaron experimentos preliminares con cada controlador y de forma cualitativa se asignaron los valores que se muestran en la tabla 4.1. Particularmente, el valor de  $K_d$  en el controlador de impedancia se eligió de tal manera que la de rigidez fuera mínima, en la percepción del participante, pero la necesaria para que la interacción sea estable.

Tabla 4.1: Valores de masa, amortiguamiento y rigidez usados.

	<b>M</b>	<b>B</b>	<b>K</b>
Control de impedancia	4	3	4
Control de admitancia	4	4	N/A
Control Maxwell	4	3	4

## 4.2. Máquina de estados para la operación del sistema

La figura 4.2 muestra la máquina diseñada para el control del sistema. El estado *Inicio* cuenta con dos condiciones de transición: para colocar el carro en la posición inicial y para dar inicio con la prueba con el control  $n$  seleccionado. La selección del control en este estado es equivalente al conmutador mostrado en la figura 4.1. Ejecutando la transición de condición  $Start = 1$  prosigue un estado de conteo regresivo de 3 segundos que previene al participante del inicio del ejercicio. Después, paralelamente se genera la trayectoria deseada y se habilita el control seleccionado. La condición de salida  $n=0$  del estado de cada control es generada por el operador al observar que el participante terminó con el ejercicio y así regresar al carro a la posición inicial. Adicionalmente, se cuenta con el estado *Paro de emergencia* que se ejecuta en caso de que alguno de los sensores de límite se active durante la prueba.

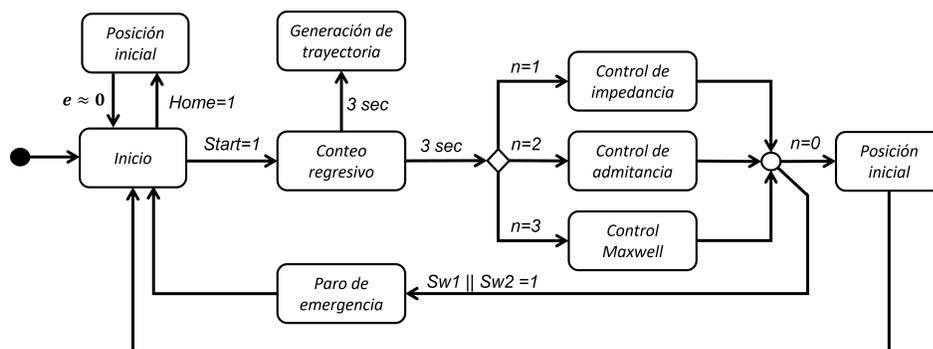


Figura 4.2: Máquina de estados para el control del sistema.

### 4.3. Trayectoria con jerk mínimo

En [45], Flash y Hogan determinaron que, para mover un objeto a lo largo de una distancia  $l_m$  dentro de un tiempo  $t_m$ , la trayectoria con jerk mínimo está dada por la ecuación 4.1, donde  $t$  es el tiempo.

$$x(t) = x_0 + (x_0 - x_f) \left( 15 \left( \frac{t}{t_f} \right)^4 - 6 \left( \frac{t}{t_f} \right)^5 - 10 \left( \frac{t}{t_f} \right)^3 \right) \quad (4.1)$$

#### 4.3.1. Trayectoria deseada para el ejercicio

Con base en las condiciones de subida y de bajada, mostradas a continuación, en la ecuación 4.1, se diseñó el ejercicio que los participantes estarían realizando con cada controlador.

Condiciones de subida

$$\begin{aligned} x_0 &= 0 \text{ m} \\ x_f &= 0.15 \text{ m} \\ t_m &= 10 \text{ s} \end{aligned}$$

Condiciones de bajada

$$\begin{aligned} x_0 &= 0.15 \text{ m} \\ x_f &= 0 \text{ m} \\ t_m &= 10 \text{ s} \end{aligned}$$

La trayectoria deseada es como se muestra en la figura 4.3. Se observa que el ejercicio a realizar consiste de dos repeticiones completas, con las condiciones mencionadas anteriormente; esto con el objetivo de conocer el desempeño del participante durante el periodo transitorio, es decir, con la primer repetición se pretende que perciba como funciona el

controlador, de tal manera que para la segunda repetición su desempeño presente mejoría.

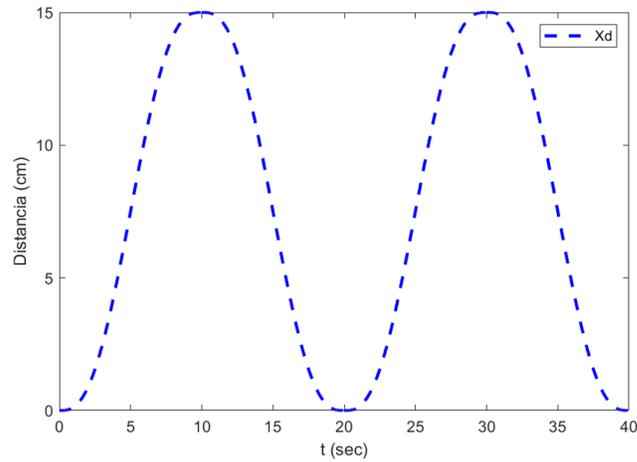


Figura 4.3: Trayectoria deseada

Además, la continuidad del ejercicio está restringida a cumplir con las condiciones  $X \geq 0.15$ , en el tramo de subida, y  $X \leq 0$  en el tramo de bajada, habiendo transcurrido el tiempo  $t_f$  en cada tramo. La figura 4.4 muestra una representación del desplazamiento que llevaría el participante y los puntos a los que debe llegar que cumplen con las restricciones. De esta manera se le compromete al participante a realizar la trayectoria completa, de lo contrario, el ejercicio no finalizará.

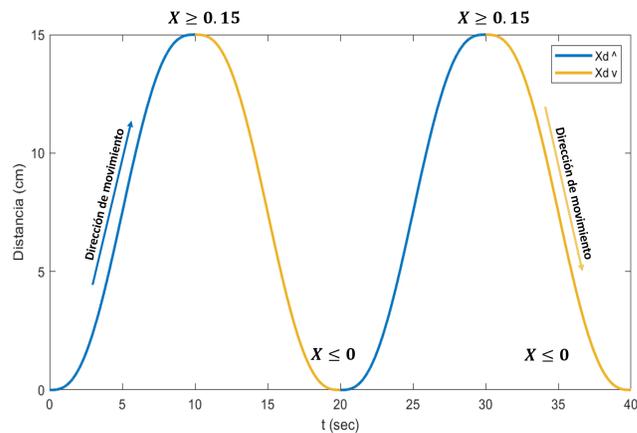


Figura 4.4: Condiciones durante la trayectoria deseada.

#### **4.4. Error de seguimiento como variable principal para la comparación**

En la sección 4.1 se presento el esquema general de control, donde se definieron los errores para los controladores implementados. Estos errores son parte de la definición de cada modelo de control. Su retroalimentación y definición permiten la interacción pero no son utilizados como variable de comparación en el análisis que se realiza más adelante. Puesto que es necesario usar la misma variable como indicio de desempeño para mantener una comparación objetiva y equitativa. Por lo que la variable  $e$ , en los índices de desempeño mostrados en el Capítulo 2, esta definida como el error de seguimiento entre de la tarea deseada  $X_d$  y la posición del participante durante el ejercicio  $X_p$ , tal como se aprecia en la ecuación 4.2.

$$e = X_d - X_p \tag{4.2}$$

#### **4.5. Retroalimentación visual**

En la figura 4.5 se muestra la retroalimentación visual que tiene como objetivo dar indicaciones al participante del inicio y término del ejercicio; mostrar una animación que represente su trayectoria en el sistema y la trayectoria deseada que debe ejecutar. El círculo rojo simula la trayectoria con jerk mínimo descrita en la sección anterior. El círculo azul indica la posición del carro o la mano del participante. De esta forma el participante observa los movimientos que hace y/o que debe hacer para alcanzar al círculo rojo.

#### **4.6. Interfaz gráfica de usuario (IGU)**

Se diseñó una IGU general para los dos tipos de usuario que interactúan con el sistema: el operador y el participante. La figura 4.6 muestra la IGU diseñada y la secciones que la conforman. La tabla 4.2 describe todos los elementos integrados.

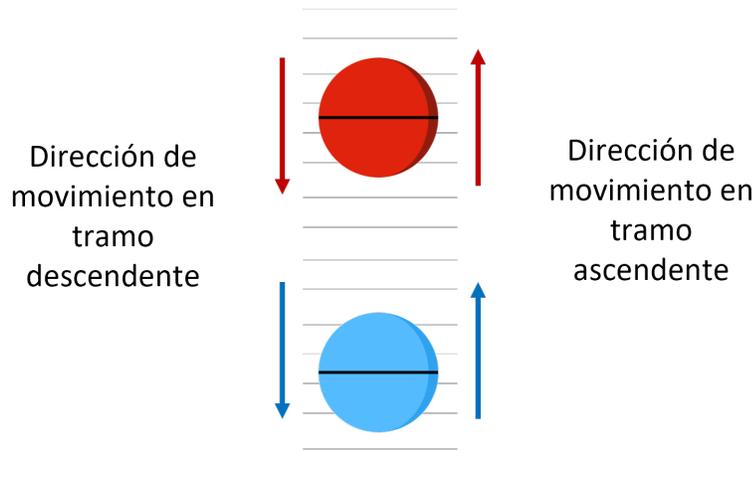


Figura 4.5: Elementos en la animación para retroalimentación visual

En la sección 1 se encuentran los controles para el operador, donde puede escoger el control que se usará, habilitar el sistema, cambiar las ganancias de cada modelo de control y del lazo interno de control de posición; además, cuenta con las opciones rápidas de:

- Elección aleatoria del modo de control.
- Ejecutar la rutina para colocar el carro en la posición inicial.
- Ajuste de la posición inicial del círculo azul.
- Habilitar directamente un modo de control para hacer pruebas preliminares.

La sección 2 es el punto de enfoque para el participante, muestra su posición (círculo azul), el objetivo (círculo rojo) y el desplazamiento de ambos durante el ejercicio. La sección 3 permite configurar la distancia  $l_m$  y el tiempo  $t_m$  de la ecuación (4.1). También se muestra el conteo regresivo y las indicaciones de inicio y fin del ejercicio (10), los valores actuales de la posición del carro (12) y la fuerza que se está aplicando (13).

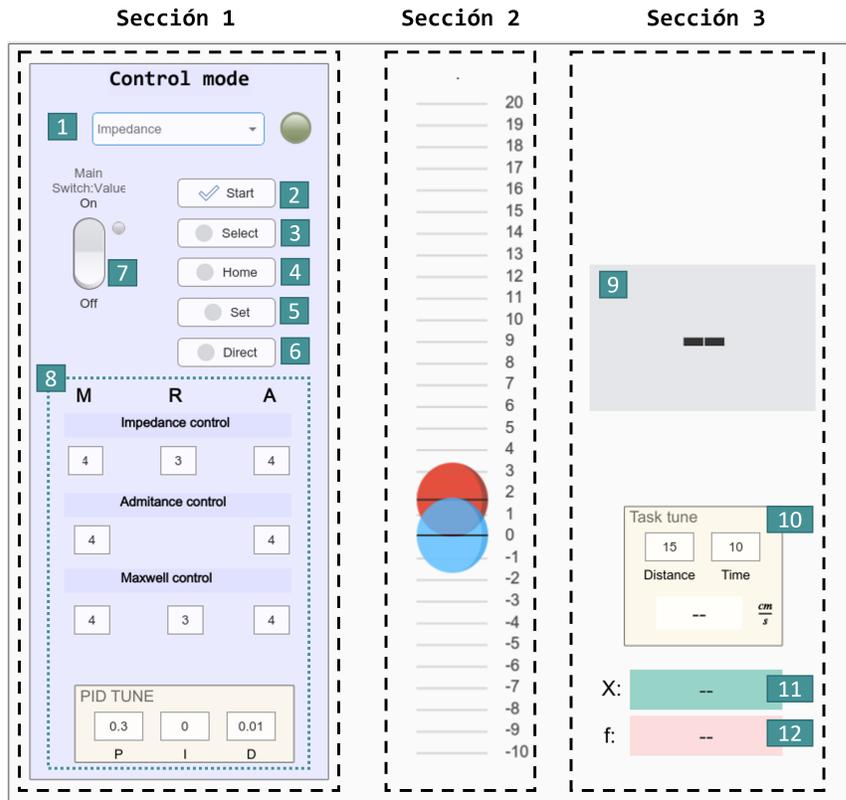


Figura 4.6: Interfaz gráfica de usuario

Tabla 4.2: Descripción de los elementos de la interfaz gráfica de usuario.

No	Descripción	No	Descripción
1	Selector del modo de control.	7	Ajuste de ganancias de los modos de control.
2	Botón de inicio del ejercicio.	8	Ajuste de ganancias
3	Botón para seleccionar aleatoriamente el modo de control.	9	Pantalla de instrucciones.
4	Botón para ejecutar la rutina de regreso.	10	Ajuste de los parámetros de trayectoria deseada.
5	Botón para ajustar la posición inicial del círculo azul.	11	Indicador de la posición actual del carro.
6	Botón para habilitar directamente el modo de control.	12	Indicador de la fuerza aplicada

## 4.7. Preguntas realizadas

Con base en las recomendaciones enunciadas en el capítulo 2 se diseñó una encuesta de 8 preguntas con una escala Likert de 4 puntos para evitar respuestas neutras. Estas 8 preguntas son idénticas para cada modo de control.

En la tabla 4.3 se muestra las 8 preguntas realizadas con su escala Likert correspondiente

Tabla 4.3: Preguntas de la encuesta aplicada.

No.	Descripción	Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
1	Requerí concentración para realizar el ejercicio usando este modo de operación.	①	②	③	④
2	Interactué intuitivamente con el robot en este modo de operación.	①	②	③	④
3	Estoy satisfecho con la interacción que tuve con el robot en este modo de operación	①	②	③	④
4	Me gustó este modo de operación.	①	②	③	④
5	Hice movimientos precisos en este modo de operación.	①	②	③	④
6	Seguí el objetivo (círculo rojo) usando este modo de operación.	①	②	③	④
7	Sentí resistencia física de parte del robot al realizar el ejercicio usando este modo de operación.	①	②	③	④
8	Sentí colaboración de parte del robot para realizar el ejercicio en este modo de operación.	①	②	③	④

Las preguntas 1 a 4 se diseñaron con la intención de conocer la percepción cognitiva del participante sobre el control, mientras que las preguntas 5 a 8 pretenden conocer la percepción física.

## 4.8. Protocolo

En la tabla 4.4 se presenta el protocolo presentado a los participantes para antes, durante y después de las pruebas experimentales.

Tabla 4.4: Protocolo

<b>Protocolo</b>
<b>Título del proyecto</b> Controladores de interacción robot-humano.
<b>Introducción del proyecto</b> Se le menciona al participante un breve resumen del estado del arte del proyecto.
<b>Descripción de los objetivos</b> Para realizar el ejercicio, a cada participante se le explicó en qué consistía el ejercicio, el funcionamiento del robot, como pueden interactuar con él y el número de repetición por cada modo de control.
<b>Metodología</b> Se le pide al participante:  <ol style="list-style-type: none"><li>1. Sentarse en la silla junto al prototipo.</li><li>2. Colocar su brazo dominante sobre el carro y colocarse en una posición de tal manera que su brazo forme un ángulo recto en la coyuntura del codo.</li></ol> Posteriormente se le explica:  <ol style="list-style-type: none"><li>1. Los elementos de la IGU relevantes para él durante la prueba.</li><li>2. La trayectoria deseada, así como las condiciones para finalizar con el ejercicio.</li><li>3. Que hará el mismo ejercicio con tres controladores distintos.</li><li>4. Al terminar la prueba pasara a responder una encuesta.</li></ol>
<b>Captura de datos</b> Una vez terminada la prueba, se le solicitó a cada participante responder la encuesta, con el propósito de evaluar su interacción con el robot. Todas las respuestas fueron guardadas y clasificadas por controlador para su posterior análisis.

---

## CAPÍTULO 5

---

# Resultados

---

Siguiendo el protocolo descrito en el Capítulo 4, se recopilieron datos de la encuesta presentada en el mismo y de todos los sensores descritos en el Capítulo 3, para obtener los resultados de cada una de las pruebas de una muestra controlada de 150 personas sin ninguna incapacidad física entre hombres y mujeres, de entre 20 y 50 años de edad como se aprecia en la figura 5.1.

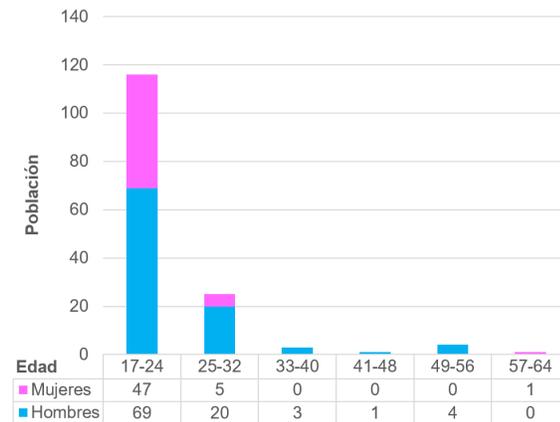


Figura 5.1: Población encuestada.

## 5.1. Procesamiento de datos

Mientras cada participante realizaba la prueba (figura 5.2) el código hecho en Simulink procesó la señal del encoder para hacer la conversión de movimiento rotacional en movimiento traslacional y así calcular la posición  $X$ . También se recopilaban las lecturas del circuito de amplificación de la galga extensiométrica descrito en el Capítulo 3 para calcular la fuerza  $f$  que el humano aplica.

Al participante se le mostró la GUI descrita en el Capítulo 3, de tal forma que observara el objetivo a seguir.



Figura 5.2: Individuo interactuando con el robot

Al terminar la prueba, un script elaborado en Matlab crea una carpeta con el nombre del participante en turno, genera una base de datos en excel de la sesión completa y una base de datos individual por controlador. Esta base de datos contiene los resultados de los índices de desempeño obtenidos, el seguimiento de trayectoria y la fuerza aplicada.

Después, según el protocolo, se solicitó a cada participante contestar la encuesta elaborada en la plataforma Google forms. Así, automáticamente se genera una base de datos de las respuestas recabadas. Estas respuestas se pueden observar en el *Apéndice B* (Respuestas de la encuesta).

## 5.2. Análisis de factores exploratorio

El estudio se realizó con una rotación ortogonal (varimax) y extracción por el método de factorización de ejes principales; estudio realizado en *Jamovi* Version 2.2.5 [46].

Las 8 preguntas se presentaron en un formato compacto  $Q_n$  donde  $n$  es el número de pregunta. Las preguntas fueron consideradas como variables dentro del análisis por lo que en el resto del Capítulo se les podrá llamar como tal. De igual manera los términos: componente, factor y variable latente, son sinónimos.

Las tablas 5.1, 5.2 y 5.3 muestran la correlación entre las variables para el control de impedancia, admitancia y Maxwell, respectivamente. Inspeccionando estas tablas se observan varios coeficientes mayores a 0.3 lo que indica una correlación estadística entre variables y por lo tanto un análisis de factores es una opción viable para encontrar los factores que las explican. [47].

Tabla 5.1: Matriz de correlación del control de impedancia

	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$	$Q_8$
$Q_1$	1.000	.137	-.054	-.069	-.150	.048	.405	.004
$Q_2$	.137	1.000	.560	.531	.452	.450	.092	.462
$Q_3$	-.054	.560	1.000	.823	.622	.511	.064	.554
$Q_4$	-.069	.531	.823	1.000	.636	.529	.036	.425
$Q_5$	-.150	.452	.622	.636	1.000	.635	.039	.510
$Q_6$	.048	.450	.511	.529	.635	1.000	.265	.510
$Q_7$	.405	.092	.064	.036	.039	.265	1.000	-.003
$Q_8$	.004	.462	.554	.425	.510	.510	-.003	1.000

Tabla 5.2: Matriz de correlación del control de admitancia

	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$	$Q_8$
$Q_1$	1.000	.180	.153	.078	-.010	.106	.358	.037
$Q_2$	.180	1.000	.582	.448	.396	.329	-.009	.534
$Q_3$	.153	.582	1.000	.679	.537	.418	.118	.443
$Q_4$	.078	.448	.679	1.000	.558	.500	-.018	.497
$Q_5$	-.010	.396	.537	.558	1.000	.517	.068	.509
$Q_6$	.106	.329	.418	.500	.517	1.000	-.020	.355
$Q_7$	.358	-.009	.118	-.018	.068	-.020	1.000	-.021
$Q_8$	.037	.534	.443	.497	.509	.355	-.021	1.000

Tabla 5.3: Matriz de correlación del control Maxwell

	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$	$Q_8$
$Q_1$	1.000	.301	.107	.124	-.001	.121	.344	.060
$Q_2$	.301	1.000	.636	.598	.413	.472	.129	.414
$Q_3$	.107	.636	1.000	.695	.408	.383	-.019	.422
$Q_4$	.124	.598	.695	1.000	.446	.467	.044	.489
$Q_5$	-.001	.413	.408	.446	1.000	.658	-.223	.425
$Q_6$	.121	.472	.383	.467	.658	1.000	-.193	.418
$Q_7$	.344	.129	-.019	.044	-.223	-.193	1.000	.136
$Q_8$	.060	.414	.422	.489	.425	.418	.136	1.000

Las tablas 5.4, 5.5, 5.6 muestran la medida de adecuación de muestra KMO y la prueba de esfericidad de Bartlett's.

La prueba Kaiser-Meyer-Okin determinó valores mayor a 0.7 que es más del valor recomendado por Kaiser [48], y la prueba de esfericidad de Barlett indica relevancia estadística sustentando así el uso de un análisis de factores exploratorio.

Tabla 5.4: Medidas de adecuación de muestra para el control de impedancia

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo	0.782	
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox $\chi^2$	441.670
	df	28
	Sig (p)	<.001

Tabla 5.5: Medidas de adecuación de muestra para el control de admitancia

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo	0.781	
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox $\chi^2$	393.179
	df	28
	Sig (p)	<.001

Tabla 5.6: Medidas de adecuación de muestra para el control Maxwell

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo	0.782	
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox $\chi^2$	361.287
	df	28
	Sig (p)	<.001

Las tablas 5.7, 5.8 y 5.9 muestran las matrices de factor y factor después de la rotación. Los valores inferiores a 0.4 fueron suprimidos pues son considerados poco representativos [49], quedando un espacio en blanco en su lugar.

En los tres estudios las preguntas que se agrupan en un mismo factor sugieren que el factor 1 representa **colaboración con el robot**, mientras que el factor 2 representa **esfuerzo físico-cognitivo**.

Tabla 5.7: Matriz factorial (a) y factor rotado (b) para el control de impedancia

Matriz factorial		
	Factor	
	1	2
$Q_3$	.858	
$Q_4$	.821	
$Q_5$	.774	
$Q_6$	.714	
$Q_2$	.645	
$Q_8$	.637	
$Q_1$		.654
$Q_7$		.627

(a)

Matriz de factor rotado		
	Factor	
	1	2
$Q_3$	.861	
$Q_4$	.825	
$Q_5$	.784	
$Q_6$	.704	
$Q_2$	.638	
$Q_8$	.637	
$Q_1$		.652
$Q_7$		.632

(b)

Tabla 5.8: Matriz factorial (a) y factor rotado (b) para el control de admittance

Matriz factorial		
	Factor	
	1	2
Q <sub>3</sub>	.792	
Q <sub>4</sub>	.787	
Q <sub>5</sub>	.716	
Q <sub>8</sub>	.654	
Q <sub>2</sub>	.652	
Q <sub>6</sub>	.590	
Q <sub>1</sub>		.722
Q <sub>7</sub>		.473

(a)

Matriz de factor rotado		
	Factor	
	1	2
Q <sub>4</sub>	.791	
Q <sub>3</sub>	.777	
Q <sub>5</sub>	.725	
Q <sub>8</sub>	.661	
Q <sub>2</sub>	.641	
Q <sub>6</sub>	.592	
Q <sub>1</sub>		.736
Q <sub>7</sub>		.476

(b)

Tabla 5.9: Matriz factorial (a) y factor rotado (b) para el control Maxwell

Matriz factorial		
	Factor	
	1	2
Q <sub>4</sub>	.784	
Q <sub>5</sub>	.715	
Q <sub>2</sub>	.696	
Q <sub>6</sub>	.689	
Q <sub>3</sub>	.628	
Q <sub>8</sub>	.603	
Q <sub>7</sub>		.746
Q <sub>1</sub>		.451

(a)

Matriz de factor rotado		
	Factor	
	1	2
Q <sub>5</sub>	.736	
Q <sub>4</sub>	.722	
Q <sub>6</sub>	.703	
Q <sub>2</sub>	.672	
Q <sub>3</sub>	.623	
Q <sub>8</sub>	.596	
Q <sub>7</sub>		.741
Q <sub>1</sub>		.461

(b)

La tabla 5.10 muestran las comunalidades antes y después de la extracción de los factores. El valor de las comunalidades representa el valor de varianza común de cada variable. La primera columna muestra una estimación de la comunalidad de cada variable que finalmente se clarifica después de la extracción, es decir, después de que la variable se ha vuelto parte de un factor.

Estas tablas muestran la varianza común existente, con la cual que se pretende encontrar variables latentes subyacentes dentro de los datos

Tabla 5.10: Comunalidades en cada controlador

(a) Impedancia			(b) Admitancia			(c) Maxwell		
Comunalidades			Comunalidades			Comunalidades		
	Inicial	Extracción		Inicial	Extracción		Inicial	Extracción
$Q_1$	.237	.428	$Q_1$	.193	.547	$Q_1$	.212	.222
$Q_2$	.403	.431	$Q_2$	.455	.427	$Q_2$	.452	.558
$Q_3$	.740	.743	$Q_3$	.591	.635	$Q_3$	.409	.396
$Q_4$	.722	.685	$Q_4$	.564	.626	$Q_4$	.466	.539
$Q_5$	.576	.622	$Q_5$	.481	.527	$Q_5$	.484	.595
$Q_6$	.533	.540	$Q_6$	.347	.351	$Q_6$	.482	.517
$Q_7$	.257	.407	$Q_7$	.179	.226	$Q_7$	.266	.557
$Q_8$	.439	.406	$Q_8$	.418	.438	$Q_8$	.346	.367

### 5.2.1. Análisis y discusión de los factores extraídos

Con base en las matrices de factor y factor rotado, los factores extraídos: colaboración con el robot (factor 1) y esfuerzo físico/cognitivo (factor 2), están representados por las mismas preguntas, aunque los pesos de estas varían dependiendo del controlador.

Las preguntas  $Q_3$ ,  $Q_4$  y  $Q_5$  resultan en el mismo orden para los controladores de impedancia y admitancia como se ve en las tablas 5.7 y 5.8, respectivamente. Estas preguntas apuntan a la percepción general del humano sobre el modo de control por lo que la percepción de los participantes fue similar al usarlos. Sin embargo, según los pesos de la pregunta  $Q_6$  y  $Q_8$ , aunque ambas conforman el factor 1, la percepción de colaboración es mayor en el controlador de admitancia que en el controlador de impedancia.

Por otro lado, el análisis del controlador Maxwell calculó pesos considerablemente diferentes al resto de controladores, como se muestra en la tabla 5.9. En primer lugar, las preguntas  $Q_4$ ,  $Q_5$  y  $Q_2$  son las más representativas para el factor 1. Este controlador presenta el mayor peso en  $Q_4$  que está asociada a la simpatía por el controlador. La pregunta  $Q_5$  implica que el participante hizo movimientos precisos o que al menos esa fue su percepción. Además,  $Q_2$  es de particular interés pues apunta específicamente a la capacidad de intuir cómo funciona el controlador. Para el resto de controladores esta pregunta es de las menos representativas del factor 1.

Con respecto al factor 2, los controladores de impedancia y admitancia obtienen resultados similares. El peso de  $Q_1$  es mayor en el control de admitancia, recordemos que este está asociado a la concentración del participante y  $Q_7$  a la resistencia física que el robot impone. En el controlador de impedancia los pesos de  $Q_7$  y  $Q_1$  tienden a un equilibrio entre

el esfuerzo físico y la concentración al usar este modo de control. En el caso del controlador Maxwell, el orden de estas preguntas está invertido, por lo que la concentración que aplicaron los participantes con este controlador fue menor que en el resto.

### 5.3. Resultado de los índices de desempeño

Los índices de desempeño descritos en el Capítulo 2 se calcularon por participante durante sus ejercicios con cada controlador. En las siguientes tablas (5.11,5.12,5.13,5.14) se muestran la media y mediana de estos valores de toda la población con cada modo de control.

Tabla 5.11: Medidas de tendencia central del error absoluto

	Integral del error absoluto		
	Control de impedancia	Control de admitancia	Control Maxwell
Media	52.74707629	33.50357478	28.881891
Mediana	49.40585204	29.21321321	25.4127311

Tabla 5.12: Medidas de tendencia central de la integral del error cuadrático

	Integral del error cuadrático		
	Control de impedancia	Control de admitancia	Control maxwell
Media	108.981806	50.0944684	38.9353696
Mediana	84.6117406	30.967335	24.4244855

Como se observa en la tablas 5.11 y 5.12, existe una mejora de desempeño considerable con los controladores de admitancia y Maxwell respecto al controlador de impedancia. Observar la magnitud del error, que incrementa ya sea que el error sea positivo o negativo, así como el erro cuadrático que penaliza ambos casos, brinda una perspectiva amplia de como fue el desempeño.

Tabla 5.13: Medidas de tendencia central de la integral temporal del error absoluto

	Integral temporal del error absoluto		
	Control de impedancia	Control de admitancia	Control Maxwell
Media	1317.60565	805.47045	668.965919
Mediana	1224.70764	709.813409	598.224193

Tabla 5.14: Medidas de tendencia central de la integral temporal del error cuadrático

	Integral temporal del error cuadrático		
	Control de impedancia	Control de admitancia	Control Maxwell
Media	2558.06801	1113.65671	824.583779
Mediana	1958.63684	716.012214	529.724659

Los índices de desempeño con los que se obtuvieron los resultados de las tablas 5.13 y 5.14, penalizan el tiempo de duración del error, lo que los hace mas sensibles a cualquier variación de parámetros. Es por esta razón, que los valores en estas tablas son mucho mas grandes que en las tablas 5.13 y 5.14. Aun así, el control de admitancia y Maxwell, continúan obteniendo mejores resultados que el control de impedancia. Es evidente que con este ultimo controlador hubo periodos largos de duración del error, lo que provoco valores considerablemente mayores respecto al resto.

En general, en las tablas 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14 la media del control de impedancia es al menos 40 % mayor respecto al resto de controladores. Por otro lado, el resultado para el control Maxwell es hasta 25 % menor respecto al control de admitancia.. Mientras que el control de admitancia obtiene medias con un valor intermedio.

#### 5.4. Correlaciones relevantes

Debido a que los datos obtenidos no muestran una distribución normal, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman [50] para datos no perimétricos. Se calculó la media de las 8 respuestas dadas por cada uno de los 150 participantes con cada controlador  $(\bar{R}_{imp_i}, \bar{R}_{adm_i}, \bar{R}_{max_i})$  y se hizo la correlación con los índices de desempeño que obtuvieron. La tabla 5.15 muestra los valores con los que se realizo dicha correlación, los coeficientes de correlación  $r_s$  y el índice  $p$  de relevancia estadística. Se consideran relevantes los coeficientes  $|r_s > 0.6|$  con  $p < 0.1$ . Del análisis hecho, ninguna correlación muestra relevancia estadística, probablemente por los valores de errores similares en medias de respuestas individuales distintas, datos independientes al tamaño de la población.

## Resultados

Tabla 5.15: Correlaciones entre la media de respuestas e índices de desempeño individuales. El subíndice  $i$  indica el número de participante (desde 1 hasta 150) y los subíndices  $imp$ ,  $adm$ ,  $max$  indican a que controlador corresponden.

Valor 1	Valor 2	$r_s$	$p$
Control de impedancia			
$\bar{R}_{imp_i}$	$IAE_{imp_i}$	.089	.277
	$ISE_{imp_i}$	.105	.199
	$ITAE_{imp_i}$	.093	.257
	$ITSE_{imp_i}$	.093	.258
Control de admitancia			
$\bar{R}_{adm_i}$	$IAE_{adm_i}$	.49	.552
	$ISE_{adm_i}$	.047	.571
	$ITAE_{adm_i}$	.021	.797
	$ITSE_{adm_i}$	.036	.662
Control de Maxwell			
$\bar{R}_{max_i}$	$IAE_{max_i}$	-.050	.545
	$ISE_{max_i}$	-.053	.520
	$ITAE_{max_i}$	-.039	.635
	$ITSE_{max_i}$	-.049	.551

Después, se hizo el cálculo de la media de las medias de todas las respuestas  $\bar{R}_t$ , es decir, se hizo la sumatoria de las medias individuales ( $\bar{R}_{imp_i}, \bar{R}_{adm_i}, \bar{R}_{max_i}$ ) y se dividió entre 150. El mismo cálculo se realizó con todos los índices de desempeño y los resultados se aprecian en la tabla 5.16, mientras que la tabla 5.17 muestra el resultado de la correlación. En este caso una relación normal es evidente, por lo tanto, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson [51], para datos con distribución normal. Debido a que el análisis de correlación se hace solo con tres datos por cada media general, solo algunos de los coeficientes muestran relevancia estadística, aún así el resultado obtenido es una aproximación significativa para relacionar la percepción humana con el desempeño actual de un controlador.

Tabla 5.16: Medias generales de las respuestas y errores con cada controlador

	$\bar{R}_t$	$\bar{X}_{IAE}$	$\bar{X}_{ISE}$	$\bar{X}_{ITAE}$	$\bar{X}_{ITSE}$
Impedancia	2.89	52.75	108.98	1317.61	2558.07
Admitancia	3.29	33.50	50.09	805.47	1113.66
Maxwell	3.30	28.88	38.94	668.97	824.58

Tabla 5.17: Correlaciones generales de las medias

Valor 1	Valor 2	$r_s$	$p$
$\bar{R}_t$	$\bar{X}_{IAE}$	-.986	.107
	$\bar{X}_{ISE}$	-.991	.085
	$\bar{X}_{ITAE}$	-.983	.118
	$\bar{X}_{ITSE}$	-.990	.089

Los coeficientes de correlación de Pearson indican una fuerte relación negativa. Los participantes tienden a evaluar de forma positiva los controladores con los que se logró un error menor.

### 5.5. Estudio paralelo convergente de los datos

Los resultados obtenidos del análisis de factores y los índices de desempeño permitieron realizar una comparación desde dos enfoques diferentes y con múltiples perspectivas. Los resultados del análisis de factores proveen y extraen la percepción general de los participantes. Mientras que los resultados de los índices de desempeño aportan información cuantitativa con la que se obtienen correlaciones objetivas.

Una vez que se han obtenidos los datos de ambas partes y habiendo hecho un análisis de resultados, se procedió a presentarlos lado a lado, observar las características o cualidades de cada uno y hacer una discusión que termine en una comprensión más amplia del problema. Para el análisis final de los datos se utilizó el método de diseño convergente [52], para triangular los resultados del análisis de factores y los valores obtenidos con los índices de desempeño.

## Resultados

Los resultados obtenidos en la tabla 5.16 se muestran mediante un gráfico de barras para una fácil descripción e interpretación. Es importante recordar que con base en el diseño de la encuesta, respuestas de  $Q_3$  y  $Q_4$  califican positivamente la interacción con el robot, mientras que respuestas de  $Q_1$  y  $Q_2$  lo hacen de forma negativa. Por otro lado, bajos valores de error durante el seguimiento indican un buen desempeño, mientras que valores altos de error indican lo contrario. Con estas aseveraciones se puede llegar a conclusiones preliminares que expliquen un panorama amplio de la interacción robot-humano que se realizó en el presente trabajo de investigación. El control Maxwell por ejemplo, presenta las medias de error más bajas como se muestra en la figura 5.3, indicando un buen seguimiento de trayectoria. Además, su media de percepción  $R_t$  indica que esta fue positiva en términos cualitativos. Observando las figuras 5.4 y 5.3 hacen evidente la relación inversa que indican los coeficientes de correlación de la tabla 5.16.

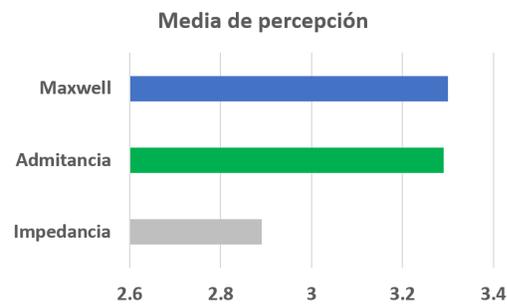


Figura 5.3: Media de percepción.

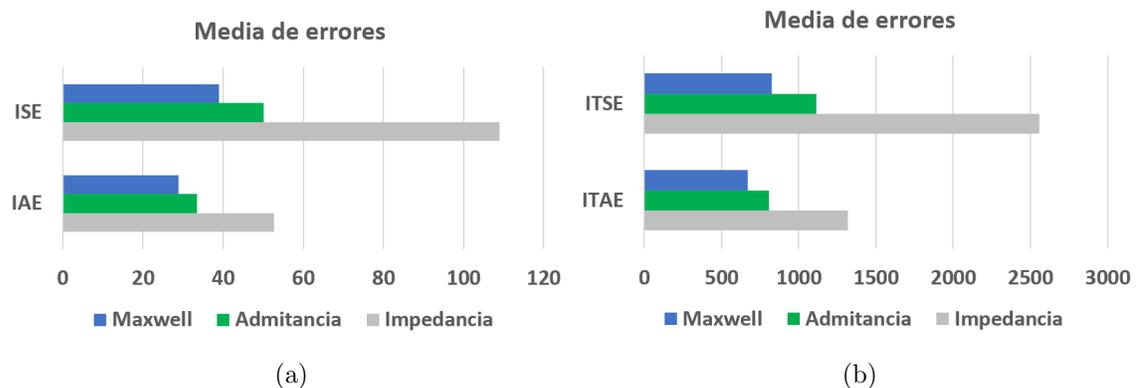


Figura 5.4: Media de desempeño.

Con el fin de indagar más en estos resultados y enfatizar algunas observaciones, a continuación se presentan gráficas que contienen índice de desempeño *IAE* y la percepción con cada controlador de 4 participantes.

La figura 5.5 muestra estos resultados con el control de impedancia. Los participantes 1, 2 y 4 evaluaron su percepción de forma negativa, obteniendo medias individuales menores a 2. De hecho, comprueban las aseveraciones mencionadas anteriormente, que indican una relación inversa entre la percepción y el desempeño de los participantes con este controlador. Por otro lado, la media de percepción del participante 3 es positiva y con una puntuación casi de 4, que es el máximo alcanzable. Sin embargo, pese a que evaluó positivamente el controlador, su desempeño durante el ejercicio fue malo desde un punto de vista de seguimiento de trayectoria, con un error mayor al resto tal como se observa en la figura 5.5a. Respuestas como la de este participante, afectan en gran medida los resultados obtenidos en la sección 5.4 ya que, respuestas opuestas en la encuesta e índices de desempeño semejantes causan una distribución no normal de los datos.

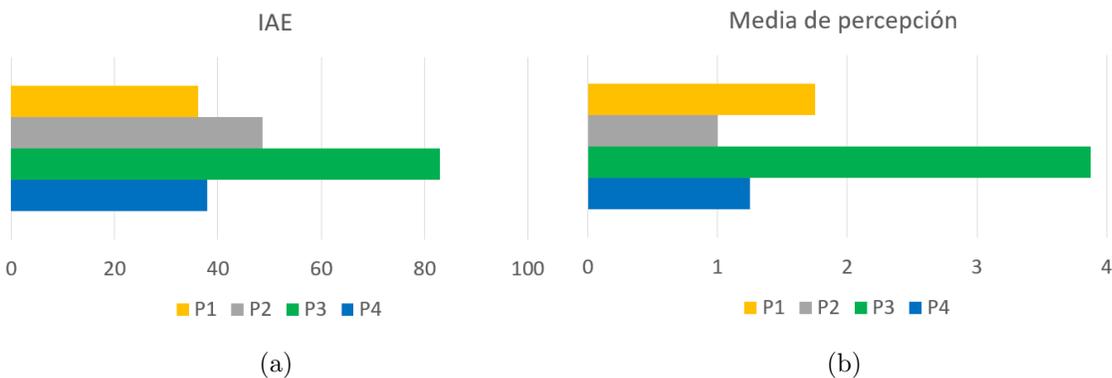


Figura 5.5: Integral del error absoluto y media de percepción con el control de impedancia.

Continuando con el control de admitancia, los resultados se aprecian en la figura 5.6. Se observan medias de percepción altas en comparación con el control de impedancia, que además, siguen una relación inversa con el desempeño obtenido. Aunque, el caso del participante 2, es similar al del participante 3 con el controlador de impedancia. Puesto que su evaluación es considerablemente menor que la del resto de participantes, a pesar de haber realizado un buen seguimiento de trayectoria que se refleja con el *IAE* en la figura 5.6a.

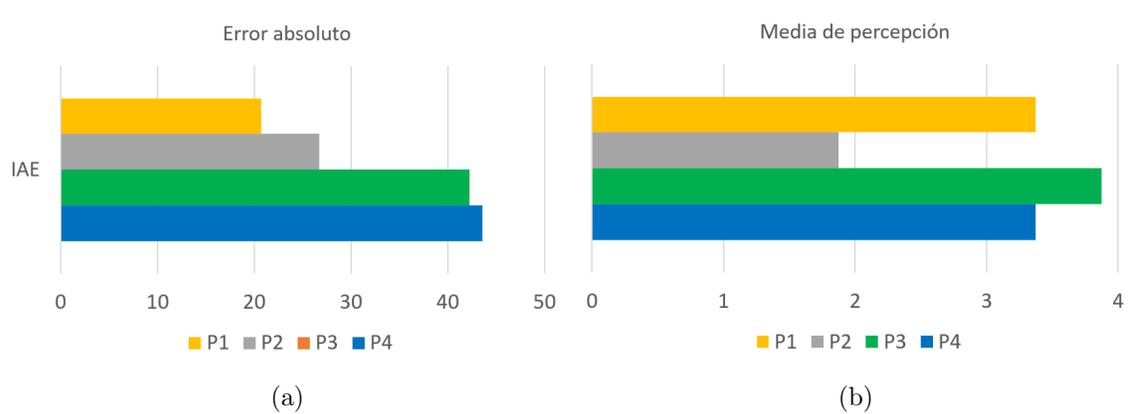


Figura 5.6: Integral del error absoluto y media de percepción con el control de admitancia.

En la figura 5.7 se observan los resultados equivalentes con el control Maxwell. Se observa similitud en la media de percepción con el control de admitancia como lo indicaron los resultados en la tabla 5.17 que también se observan en la figura 5.4.

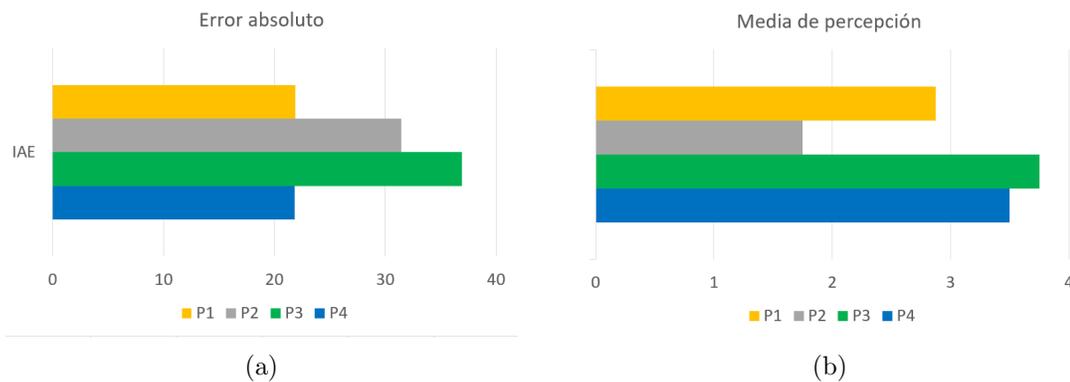


Figura 5.7: Integral del error absoluto y media de percepción con el control Maxwell.

A continuación, se presentan las gráficas de desempeño (figuras 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11) de cuatro participantes que validan lo mencionado anteriormente. Se puede observar que el orden de los controladores fue aleatorio en los cuatro casos para asegurar una comparación objetiva, eliminando posibles patrones de calificaciones para el primer y último controlador. En la parte superior se observa la fuerza que aplicaron mientras que en la parte inferior se muestra el seguimiento de trayectoria. Las abreviaciones en la descripción de cada figura indican el orden en el que se aplicaron los controladores.

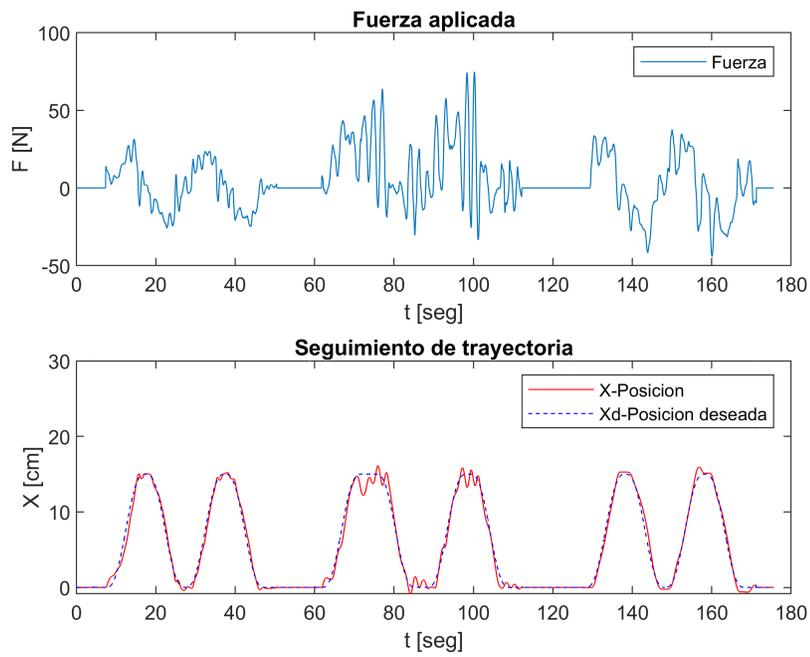


Figura 5.8: Participante 1. Max-Imp-Adm

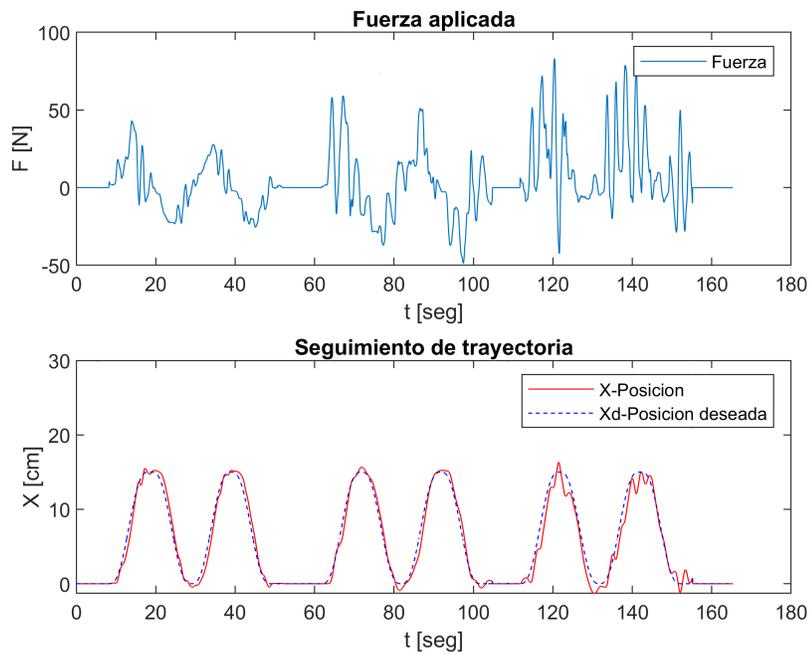


Figura 5.9: Participante 2. Max-Adm-Imp

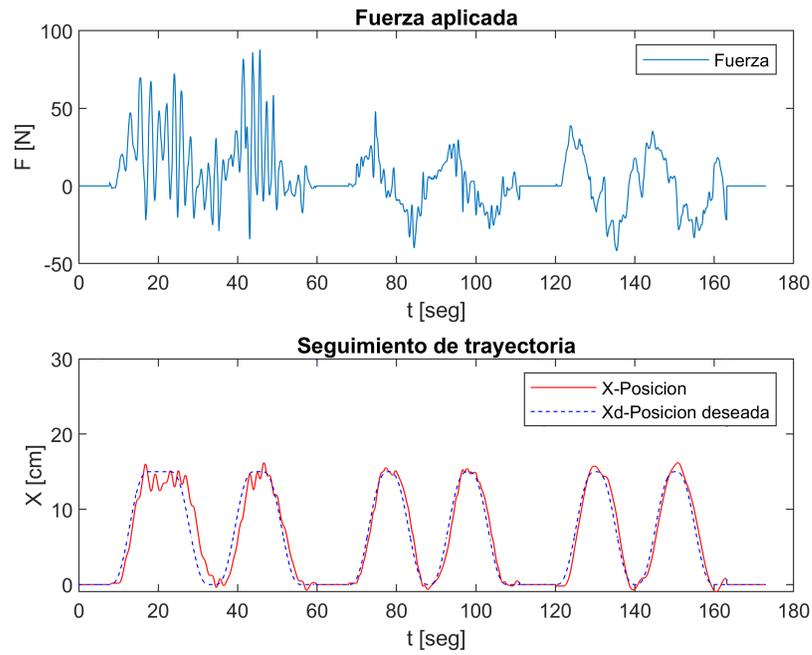


Figura 5.10: Participante 3. Imp-Max-Adm

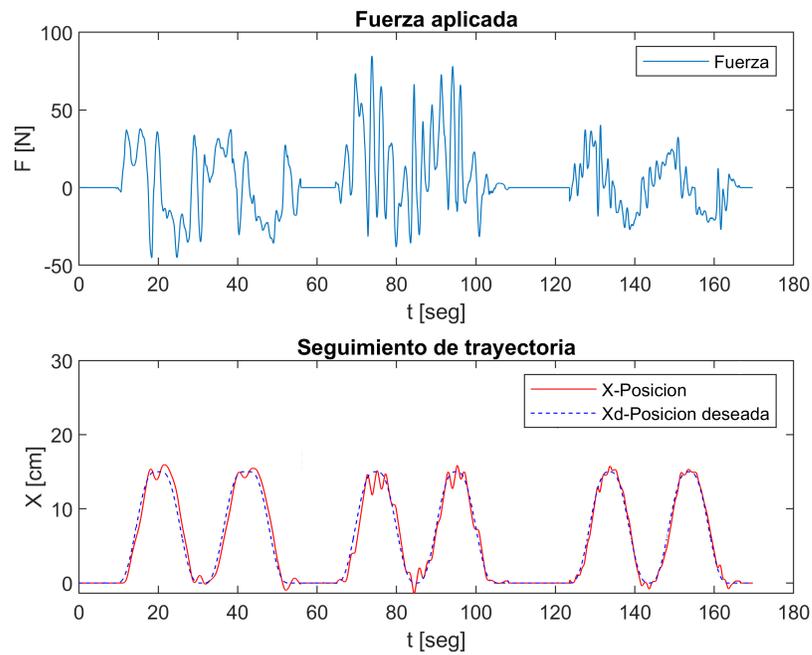
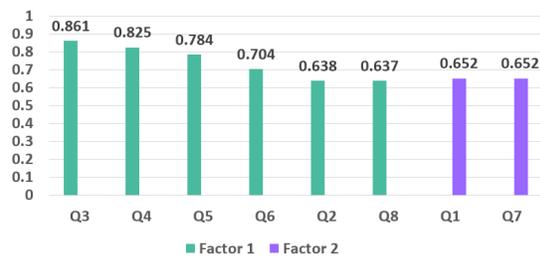


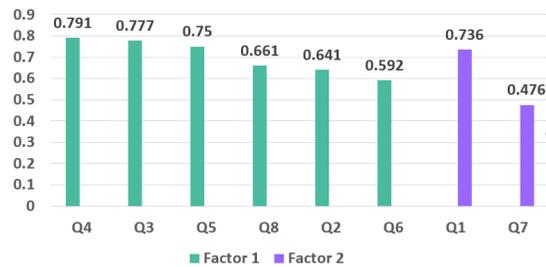
Figura 5.11: Participante 4. Adm-Imp-Max

En todos los casos, el control de impedancia presentó oscilaciones en los puntos máximos y mínimos del seguimiento de trayectoria, esto a su vez con incrementos en el valor absoluto de la fuerza aplicada. Esto se debe al efecto de rigidez intrínseco del modelo de impedancia que el participante debe superar para continuar con su movimiento. En cuanto al control de admitancia y Maxwell, se observa un seguimiento más suave con valores considerablemente menores de fuerza aplicada.

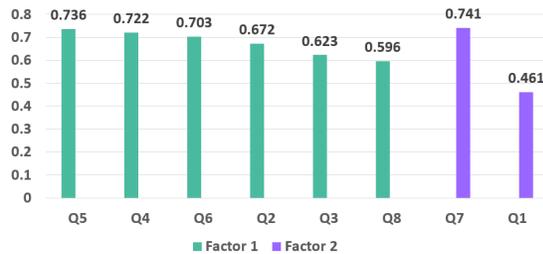
Además, conviene recapitular los factores obtenidos en la sección 5.2 y mostrarlos junto a la media de fuerza aplicada por los participantes mostrada en la figura 5.12d. Recordemos que se le denominó **colaboración con el robot** al factor 1 y **esfuerzo físico-cognitivo** al factor 2. Las figuras 5.12a, 5.12b y 5.12c muestran los factores desglosados. Aunque se muestre la media de fuerza aplicada por los participantes durante las pruebas, es importante notar también la fuerza real que aplicaron durante los ejercicios en las figuras 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11.



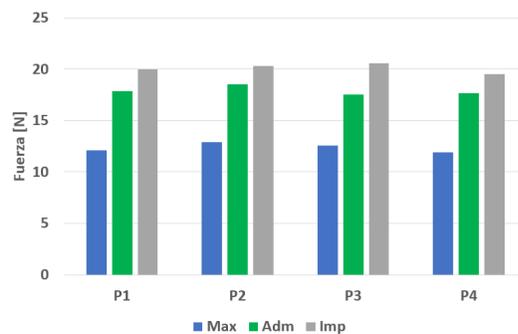
(a) Factores del control de impedancia.



(b) Factores en el control de admitancia.



(c) Factores en el control Maxwell



(d) Fuerza aplicada por 4 participantes.

Figura 5.12: Cargas factoriales y media de fuerza aplicada.

La media de fuerza aplicada con el controlador de impedancia es mayor en todos los casos. Al mismo tiempo, el esfuerzo físico-cognitivo en este controlador es el único con una relación completamente simétrica entre las preguntas que lo conforman con cargas significativas mayores a 0.6. El controlador de admitancia, como se analizó en la sección 5.2.1, presentó un factor de **colaboración con el robot** más fuerte que el controlador de impedancia. La media de fuerza aplicada por los 4 participantes es menor, la carga factorial de la pregunta  $Q_7$  en este controlador, que apunta a este aspecto, también es menor, mientras que la pregunta  $Q_1$  que apunta a la concentración durante el ejercicio es mucho mayor.

En el caso del controlador Maxwell, el factor **colaboración con el robot** estuvo representado fuertemente por las preguntas que apuntan a la simpatía y percepción de un buen desempeño con el robot. Al mismo tiempo, presentó la media de fuerza aplicada más baja de los tres. Y a diferencia del resto de controladores, en el factor **esfuerzo físico-cognitivo**,  $Q_1$  tiene la menor carga factorial y  $Q_7$  mantiene una relación semi proporcional con su valor en el factor 2 de los demás controladores. En resumen, los participantes calificaron positivamente los controladores con los que su seguimiento del objetivo fue mejor pese a la fuerza que requirieron para hacerlo. Tal es el caso de los controladores de admitancia y Maxwell. Inclusive el control de impedancia obtiene un factor de **colaboración con el robot** semejante al resto. Aunque la media de percepción, que clarifica la tendencia de las respuesta dadas, fue baja debido a la fuerza requerida y las oscilaciones en los extremos.

---

## CAPÍTULO 6

---

# Conclusiones

---

### 6.1. Conclusiones del trabajo

El control de impedancia presentó ventajas sobre otro tipo de controladores al ser fácil de implementar y adaptar. Con sólo tres parámetros, presentes en cualquier sistema, se controla la interacción; se pueden incluir parámetros adicionales para ambientes complejos resultando en versiones complejas o particulares del control de impedancia. Otra cualidad de este control es que fue desarrollado con base en las articulaciones y movimiento humano por lo que se pueden elegir los valores de  $M$ ,  $K$ , y  $B$  de forma cualitativa con base en percepción y sensaciones del operador sobre la impedancia actual.

Aunque en la literatura existe gran cantidad de controladores basados en impedancia, poca es la exploración para conocer la percepción del humano al usarlos. Se hace énfasis en demostraciones de estabilidad y detalles del modelo matemático, que son cualidades necesarias pero no cubren la percepción humana. Para realizar una comparación objetiva

y completa es necesario definir una tarea que el usuario perciba como un objetivo. De esta manera se establece una métrica de evaluación que, usando técnicas cuantitativas y cualitativas, sirve para determinar si un control es apto para la aplicación actual desde ambas perspectivas. Dependiendo de la aplicación, se pueden sugerir estudios para evaluar la interacción, en el caso de este trabajo de investigación fue necesario incluir una muestra amplia, ya que los participantes tienen poco o nulo conocimiento teórico sobre el tema, en consecuencia las respuestas a la encuesta presentan una distribución no normal lo que requiere de técnicas estadísticas complejas para su análisis.

Los controles de admitancia y Maxwell presentan ventaja sobre el control tradicional de impedancia debido a la asistencia que otorgan en ambas direcciones de movimiento. El control de impedancia tradicional presenta una etapa de asistencia y otra de resistencia; cualidades intrínsecas que provocaron la evaluación estudiada en el Capítulo 5. El control Maxwell obtuvo la mayor media de percepción  $R_t$  ya que no contiene este efecto resistivo y además atenúa los efectos de la inercia debido a su configuración de los elementos masa, resorte y amortiguador. Por su parte, el análisis del control de admitancia indica que, para la interacción propuesta en esta tesis, es la opción con mayor aprobación por la población encuestada. El modelo de admitancia le permite al participante intuir la fuerza necesaria para contrarrestar los efectos de la inercia, algo observable en las gráficas de desempeño de los participantes en la sección 5.5. Además, la media de percepción difiere mínimamente con la del controlador Maxwell cuyas gráficas de desempeño, pese a presentar precisión, presentaron oscilaciones bruscas en los extremos donde sucede el cambio de sentido de dirección. Los participantes no aplicaron fuerza en dirección contraria al movimiento hasta llegar a la referencia, en seguida aplicaban fuerza en el sentido contrario que superaba la aceleración del objetivo (círculo rojo) regida por la ecuación de jerk mínimo presentada en el Capítulo 2, provocando así esas oscilaciones al intentar mantener la referencia.

En la sección 5.4 se observa que no hubo relevancia estadística entre las correlaciones obtenidas. Aunque las medidas de adecuación de muestreo mostradas en la sección 5.2 están catalogadas como buenas, se podría aumentar esta medida con una población superior a 500 personas. Aunque es importante notar, que el diseño de la encuesta y la aplicación de otros cuestionarios para medir otras características de la población, afectan este valor de muestra. La naturaleza de los datos y la forma de analizarlos dictaminan fundamentalmente la relevancia estadística.

Finalmente, es importante enfatizar que el estudio exploratorio aquí presentado es uno de los primeros realizados de acuerdo con la literatura consultada. Se recolectaron datos

cuantitativos del robot y cualitativos del humano, para intentar encontrar correlaciones latentes entre ellos. Del análisis de factores exploratorio se pueden hacer consideraciones o intuir características útiles en el diseño de un controlador pHRI. Está claro que no basta con considerar las métricas ingenieriles usuales. Con los índices de desempeño solo se evalúa una parte de la interacción pero son los datos cualitativos dados por el humano los que clarifican y determinan como fue dicha interacción.

## **6.2. Trabajo futuro**

Como trabajo futuro se propone:

- Aumentar la muestra de participantes para encontrar nuevos factores durante la interacción.
- Diseñar preguntas que apunten a otros aspectos (médicos, psicométricos por mencionar algunos ) de la interacción física robot-humano.
- Incluir en el instrumento de evaluación datos adicionales como profesión y deporte que realizan, pues son factores que influyen en la evaluación de los efectos de resistencia y asistencia de un controlador.
- Realizar más estudios estadísticos con técnicas no paramétricas y comparar los resultados obtenidos.
- Diseñar una IGU que permita ingresar los datos de los participantes y los almacene junto con los datos de los sensores de manera automática.
- Utilizar más sensores que midan el comportamiento humano y así identificar otros factores que relacionen la percepción humana con la dinámica de un controlador.

# Bibliografía

- [1] C. Freschi, V. Ferrari, F. Melfi, M. Ferrari, F. Mosca, and A. Cuschieri, “Technical review of the da vinci surgical telemanipulator,” *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 9, no. 4, pp. 396–406, 2013.
- [2] N. Hogan, H. I. Krebs, J. Charnnarong, P. Srikrishna, and A. Sharon, “Mit-manus: a workstation for manual therapy and training. i,” in *[1992] Proceedings IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*. IEEE, 1992, pp. 161–165.
- [3] A. Mörtl, M. Lawitzky, A. Kucukyilmaz, M. Sezgin, C. Basdogan, and S. Hirche, “The role of roles: Physical cooperation between humans and robots,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 31, no. 13, pp. 1656–1674, 2012.
- [4] N. Hogan, “Impedance control: An approach to manipulation,” in *1984 American control conference*. IEEE, 1984, pp. 304–313.
- [5] Y. Nakamura, K. Yamane, Y. Fujita, and I. Suzuki, “Somatosensory computation for man-machine interface from motion-capture data and musculoskeletal human model,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 1, pp. 58–66, 2005.
- [6] B. L. Shields, J. A. Main, S. W. Peterson, and A. M. Strauss, “An anthropomorphic hand exoskeleton to prevent astronaut hand fatigue during extravehicular activities,” *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics-part A: systems and humans*, vol. 27, no. 5, pp. 668–673, 1997.
- [7] C. Breazeal, “Designing sociable machines,” in *Socially intelligent agents*. Springer, 2002, pp. 149–156.
- [8] Y. Demiris and A. Meltzoff, “The robot in the crib: A developmental analysis of

- 
- imitation skills in infants and robots,” *Infant and Child Development: An International Journal of Research and Practice*, vol. 17, no. 1, pp. 43–53, 2008.
- [9] F. Tanaka, J. R. Movellan, B. Fortenberry, and K. Aisaka, “Daily hri evaluation at a classroom environment: reports from dance interaction experiments,” in *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction*, 2006, pp. 3–9.
- [10] J. Solis, K. Chida, K. Suefuji, and A. Takanishi, “The development of the anthropomorphic flutist robot at waseda university,” *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 3, no. 02, pp. 127–151, 2006.
- [11] M. A. Goodrich and D. R. Olsen, “Seven principles of efficient human robot interaction,” in *SMC’03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme-System Security and Assurance (Cat. No. 03CH37483)*, vol. 4. IEEE, 2003, pp. 3942–3948.
- [12] M. T. Mason, “Compliance and force control for computer controlled manipulators,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 11, no. 6, pp. 418–432, 1981.
- [13] D. E. Whitney, “Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 99, no. 2, pp. 91–97, 06 1977. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.3427095>
- [14] M. H. Raibert and J. J. Craig, “Hybrid Position/Force Control of Manipulators,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 103, no. 2, pp. 126–133, 06 1981. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.3139652>
- [15] N. Hogan, “Adaptive control of mechanical impedance by coactivation of antagonist muscles,” *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 29, no. 8, pp. 681–690, 1984.
- [16] H. Seraji and R. Colbaugh, “Force tracking in impedance control,” *The International journal of robotics research*, vol. 16, no. 1, pp. 97–117, 1997.
- [17] C. Ott, A. Albu-Schaffer, A. Kugi, and G. Hirzinger, “On the passivity-based impedance control of flexible joint robots,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 2, pp. 416–429, 2008.

- [18] J. Buchli, F. Stulp, E. Theodorou, and S. Schaal, “Learning variable impedance control,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 30, no. 7, pp. 820–833, 2011.
- [19] W. He and Y. Dong, “Adaptive fuzzy neural network control for a constrained robot using impedance learning,” *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, vol. 29, no. 4, pp. 1174–1186, 2017.
- [20] X. Zhang, L. Sun, Z. Kuang, and M. Tomizuka, “Learning variable impedance control via inverse reinforcement learning for force-related tasks,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 2225–2232, 2021.
- [21] Z. Li, Z. Huang, W. He, and C.-Y. Su, “Adaptive impedance control for an upper limb robotic exoskeleton using biological signals,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 2, pp. 1664–1674, 2016.
- [22] L. Peternel, T. Petrič, and J. Babič, “Human-in-the-loop approach for teaching robot assembly tasks using impedance control interface,” in *2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE, 2015, pp. 1497–1502.
- [23] T. Boaventura, J. Buchli, C. Semini, and D. G. Caldwell, “Model-based hydraulic impedance control for dynamic robots,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 6, pp. 1324–1336, 2015.
- [24] M.-S. Ju, C.-C. Lin, D.-H. Lin, I.-S. Hwang, and S.-M. Chen, “A rehabilitation robot with force-position hybrid fuzzy controller: hybrid fuzzy control of rehabilitation robot,” *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 349–358, 2005.
- [25] Y. Aydin, O. Tokatli, V. Patoglu, and C. Basdogan, “Stable physical human-robot interaction using fractional order admittance control,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 11, no. 3, pp. 464–475, 2018.
- [26] E. D. Engeberg and S. G. Meek, “Backstepping and sliding mode control hybridized for a prosthetic hand,” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 70–79, 2008.
- [27] P. Song, Y. Yu, and X. Zhang, “A tutorial survey and comparison of impedance control on robotic manipulation,” *Robotica*, vol. 37, no. 5, pp. 801–836, 2019.

- [28] Y. Hu, M. Benallegue, G. Venture, and E. Yoshida, “Interact with me: An exploratory study on interaction factors for active physical human-robot interaction,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 6764–6771, 2020.
- [29] C. Croux and C. Dehon, “Influence functions of the spearman and kendall correlation measures,” *Statistical methods & applications*, vol. 19, no. 4, pp. 497–515, 2010.
- [30] G. Kang, H. S. Oh, J. K. Seo, U. Kim, and H. R. Choi, “Variable admittance control of robot manipulators based on human intention,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 24, no. 3, pp. 1023–1032, 2019.
- [31] H.-Y. Li, I. Paranawithana, L. Yang, T. S. K. Lim, S. Foong, F. C. Ng, and U.-X. Tan, “Stable and compliant motion of physical human–robot interaction coupled with a moving environment using variable admittance and adaptive control,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 2493–2500, 2018.
- [32] Y. Li and S. S. Ge, “Human–robot collaboration based on motion intention estimation,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, no. 3, pp. 1007–1014, 2013.
- [33] L. Fu and J. Zhao, “Maxwell-model-based compliance control for human–robot friendly interaction,” *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 118–131, 2020.
- [34] S. M. Shinnars, *Modern control system theory and design*. John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [35] A. Field, *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. sage, 2013.
- [36] L. R. Fabrigar, D. T. Wegener, R. C. MacCallum, and E. J. Strahan, “Evaluating the use of exploratory factor analysis in psychological research.” *Psychological methods*, vol. 4, no. 3, p. 272, 1999.
- [37] B. G. Tabachnick and L. S. Fidell, “Principal components and factor analysis,” *Using multivariate statistics*, vol. 4, no. 1, pp. 582–633, 2001.
- [38] H. Kahane, A. Hausman, and F. Boardman, *Logic and philosophy: A modern introduction*. Hackett Publishing, Indiana, 2020.

- [39] J. R. Rossiter, “Marketing measurement revolution: The c-oar-se method and why it must replace psychometrics,” *European Journal of Marketing*, 2011.
- [40] D. Goretzko, T. T. H. Pham, and M. Bühner, “Exploratory factor analysis: Current use, methodological developments and recommendations for good practice,” *Current Psychology*, vol. 40, no. 7, pp. 3510–3521, 2021.
- [41] P. Bacchetti, S. G. Deeks, and J. M. McCune, “Breaking free of sample size dogma to perform innovative translational research,” *Science translational medicine*, vol. 3, no. 87, pp. 87ps24–87ps24, 2011.
- [42] R. Ávila, L. Prado, and E. González, “Dimensiones antropométricas de la población latinoamericana: México, cuba, colombia, chile,” *Guadalajara: Universidad de Guadalajara*, 2007.
- [43] H. Modares, I. Ranatunga, F. L. Lewis, and D. O. Popa, “Optimized assistive human–robot interaction using reinforcement learning,” *IEEE transactions on cybernetics*, vol. 46, no. 3, pp. 655–667, 2015.
- [44] Y. Li, K. P. Tee, W. L. Chan, R. Yan, Y. Chua, and D. K. Limbu, “Continuous role adaptation for human–robot shared control,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 3, pp. 672–681, 2015.
- [45] T. Flash and N. Hogan, “The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model,” *Journal of neuroscience*, vol. 5, no. 7, pp. 1688–1703, 1985.
- [46] The jamovi project, “jamovi.” [Online]. Available: <https://www.jamovi.org>
- [47] B. G. Tabachnick, L. S. Fidell, and J. B. Ullman, *Using multivariate statistics*. pearson Boston, MA, 2007, vol. 5.
- [48] H. F. Kaiser, “A second generation little jiffy.” 1970.
- [49] J. P. Stevens, *Applied multivariate statistics for the social sciences*. Routledge, 2012.
- [50] C. Spearman, “The proof and measurement of association between two things.” *Illinois*, 1961.

- [51] D. Freedman, R. Pisani, and R. Purves, “Statistics (international student edition),” *Pisani, R. Purves, 4th edn. WW Norton & Company, New York, 2007.*
- [52] J. W. Creswell and V. L. P. Clark, *Designing and conducting mixed methods research.* Sage publications, 2017.

———— Resultados preliminares ————

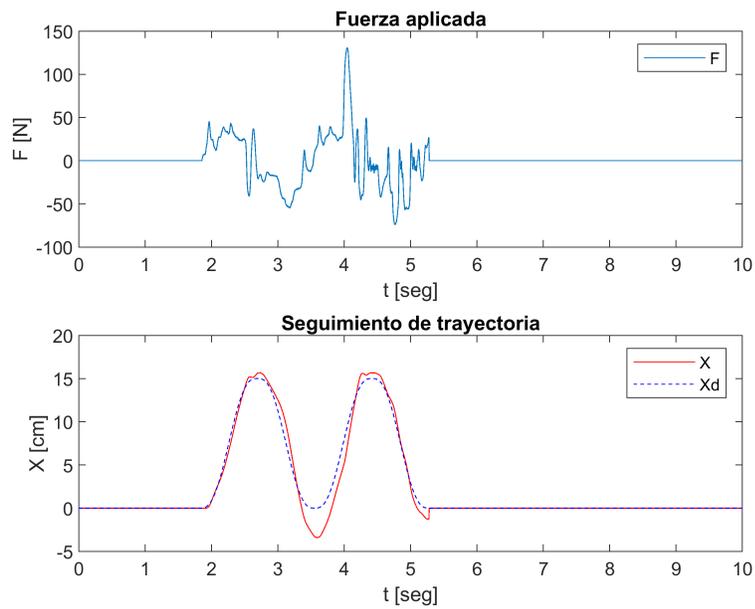


Figura A.1: Participante 1 - Admitancia adaptable

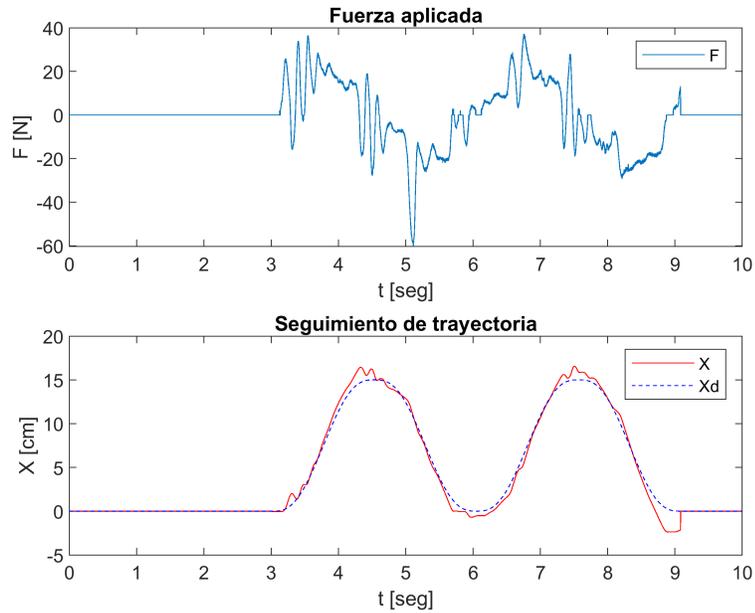


Figura A.2: Participante 1 - Impedancia adaptable

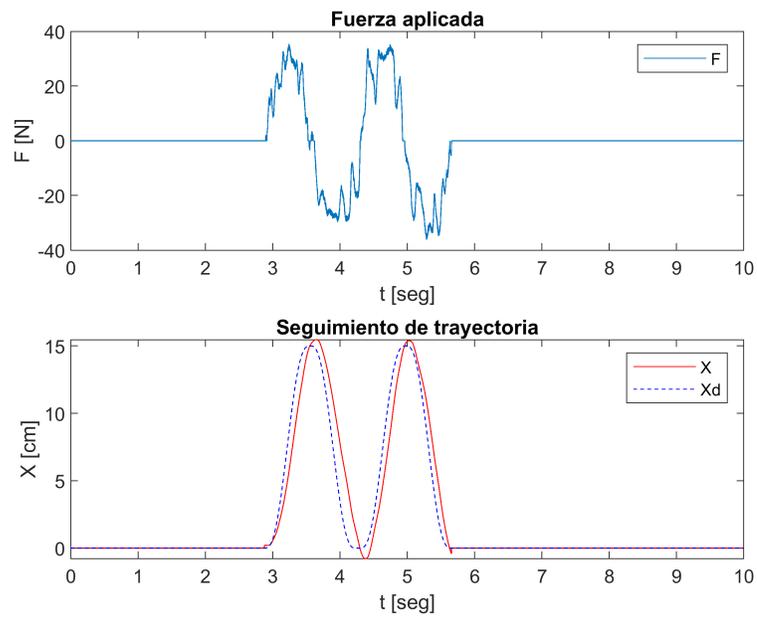


Figura A.3: Participante 2 - Admitancia adaptable

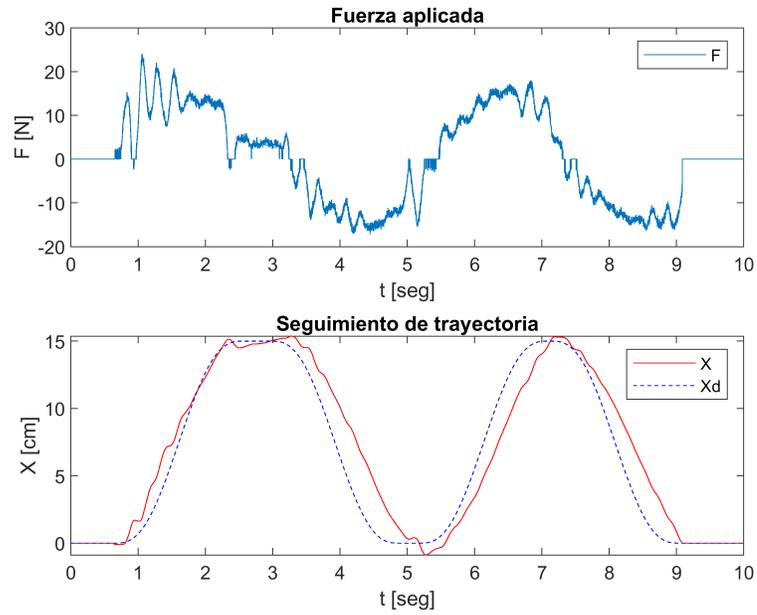


Figura A.4: Participante 2 - Impedancia adaptable

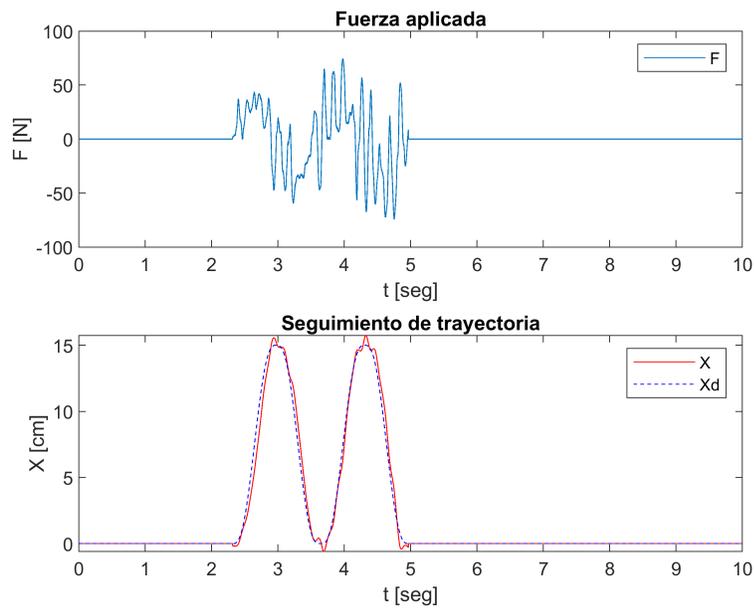


Figura A.5: Participante 3 - Admitancia adaptable

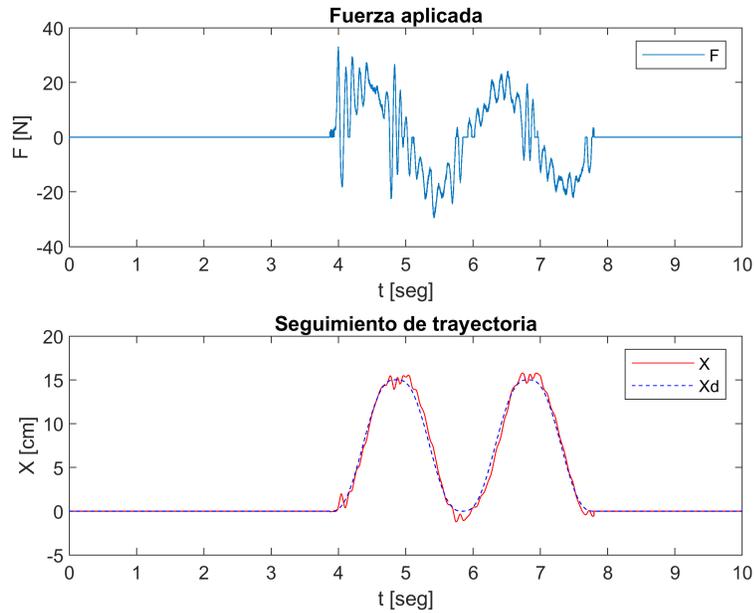


Figura A.6: Participante 3 - Impedancia adaptable

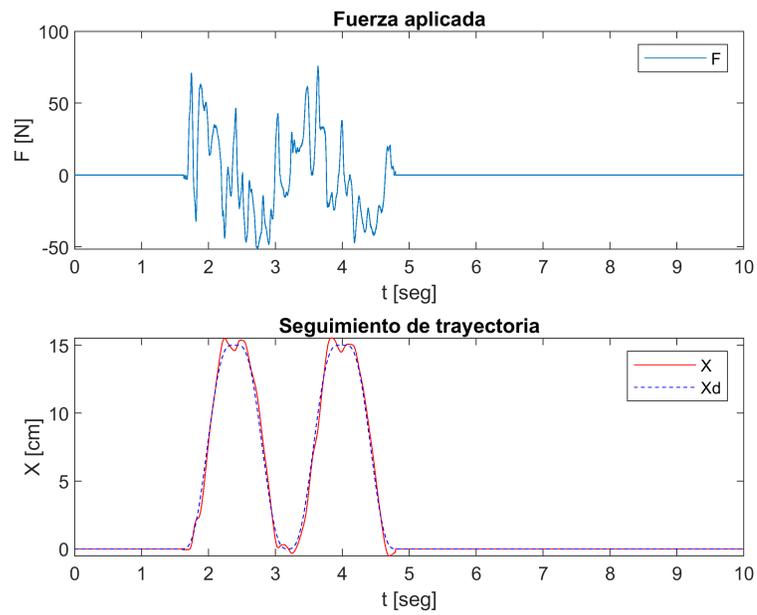


Figura A.7: Participante 4 - Admitancia adaptable

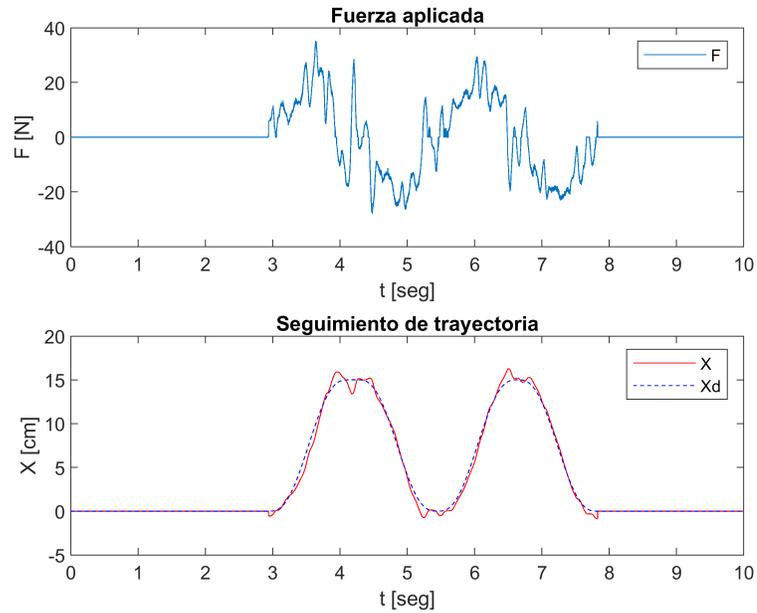


Figura A.8: Participante 4 - Impedancia adaptable

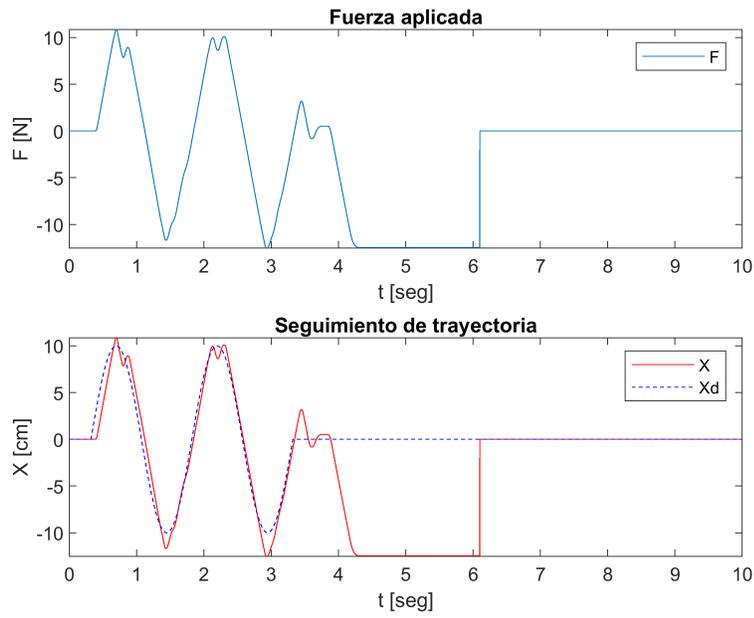


Figura A.9: Participante 5 - Admitancia adaptable

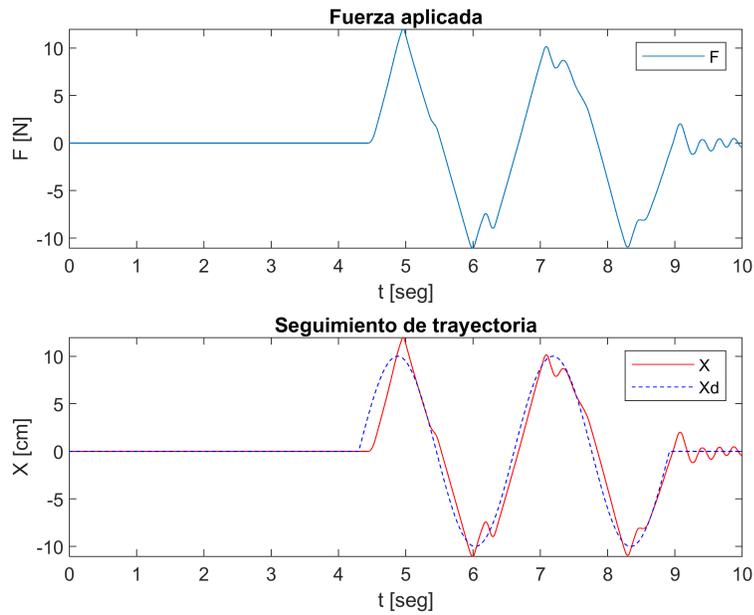


Figura A.10: Participante 5 - Impedancia adaptable

————— Respuestas de la encuesta —————

P	Impedancia								Admitancia								Maxwell							
	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>
1	4	4	2	2	4	2	4	2	3	3	4	4	3	4	1	3	3	3	4	4	3	3	2	3
2	4	2	2	2	2	2	4	2	3	4	4	4	4	4	2	4	3	4	3	3	4	3	3	3
3	4	1	2	2	1	3	4	1	2	4	3	4	3	4	2	4	3	3	3	3	3	4	2	3
4	3	3	4	4	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	2	3	3	3	3	3	3	3
5	4	3	3	4	2	3	4	4	3	3	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	4	2	3	4
6	4	3	3	2	2	2	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4
7	4	1	2	1	2	1	4	1	2	4	4	4	3	3	2	4	4	4	4	4	4	2	3	3
8	4	2	2	2	1	2	4	1	2	4	4	4	4	4	1	3	3	3	3	3	3	3	2	3
9	4	2	2	1	2	4	2	4	3	3	4	4	4	4	2	4	3	3	3	3	3	3	2	2
10	4	3	2	1	1	1	4	1	3	3	4	4	4	4	2	2	2	3	3	3	3	3	2	2
11	3	2	2	2	2	2	3	2	3	3	3	4	4	1	3	3	3	3	4	4	3	4	4	
12	4	2	1	1	2	1	3	2	4	2	1	3	2	1	2	3	3	3	4	4	3	3	2	3
13	4	2	1	1	1	2	4	4	4	2	1	1	3	2	1	3	4	4	4	4	3	3	3	3
14	3	3	3	1	2	4	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	2	3	3	2	3
15	4	4	4	4	3	3	4	3	3	4	4	4	3	3	4	4	4	4	3	4	3	4	2	3
16	4	2	1	1	1	2	4	1	2	4	4	4	3	3	4	2	4	4	4	4	4	4	2	3
17	4	1	2	2	1	2	4	3	2	4	3	3	3	3	2	4	3	3	3	3	3	3	2	3
18	4	1	1	1	1	4	2	2	2	4	4	3	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	1	1
19	4	1	2	2	1	1	4	1	1	4	4	4	4	4	1	4	3	3	2	2	3	3	2	3
20	4	3	2	2	2	2	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3
21	1	2	4	4	3	2	1	2	2	2	2	3	3	3	2	1	4	4	3	3	3	3	3	3
22	4	4	4	3	2	2	3	4	4	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4	4	3	3	2	4
23	4	2	1	1	1	1	4	1	3	4	2	2	2	2	3	2	3	4	4	4	3	3	2	4
24	4	2	1	2	2	2	4	1	3	3	4	4	3	3	3	2	3	3	2	3	3	2	3	1
25	4	1	2	1	1	2	4	4	4	3	3	4	3	2	2	1	4	2	2	2	3	3	2	3
26	4	2	3	4	3	2	3	2	2	3	3	4	4	4	3	3	3	4	4	4	3	4	3	4
27	4	4	4	4	4	4	3	4	3	4	4	4	4	4	3	3	4	4	4	4	3	4	2	2
28	4	3	1	2	1	4	4	3	4	3	3	4	3	4	2	3	4	3	3	2	3	4	3	3
29	4	4	2	2	2	2	3	2	3	3	4	3	3	3	4	3	4	4	4	3	3	4	1	3
30	3	1	1	1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	3	2	3	4	4	4	4	4	4	4	1
31	4	3	4	4	3	4	3	3	4	4	4	4	3	4	3	4	4	4	4	4	4	3	2	4
32	4	4	2	2	1	3	4	3	3	4	4	4	2	3	3	3	4	3	4	3	2	3	4	2
33	3	4	4	4	4	4	3	4	3	4	4	4	4	3	2	4	4	3	4	4	4	4	1	4
34	4	4	3	3	1	2	3	2	4	4	4	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	3	3	3
35	4	2	2	1	1	1	4	1	3	4	4	4	3	4	1	4	3	2	2	2	2	2	3	2
36	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
37	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
38	3	3	2	3	2	3	4	3	4	3	4	4	4	4	4	3	4	3	3	4	4	4	1	4
39	4	4	4	4	3	3	4	2	2	4	4	4	4	4	3	4	3	4	4	4	4	3	4	3
40	4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	4
41	4	2	3	2	2	2	4	2	3	4	4	3	4	4	3	3	4	4	3	3	4	3	4	2
42	4	3	2	2	1	2	4	2	4	4	4	4	4	4	2	3	4	3	3	3	3	3	3	2
43	4	1	1	1	1	3	1	1	2	4	4	4	4	3	3	2	3	3	3	4	4	1	4	4
44	4	3	2	2	2	2	4	1	3	3	4	3	3	3	2	3	3	3	3	3	4	4	2	3

P	Impedancia								Admitancia								Maxwell							
	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>
45	4	3	3	2	2	3	4	3	4	4	4	4	4	4	2	3	4	4	4	3	4	4	3	4
46	4	4	4	2	2	2	4	3	4	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
47	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
48	4	4	2	2	2	3	4	2	4	4	4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	3	3	3	2
49	4	4	3	3	3	3	4	2	4	4	4	3	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
50	3	3	4	3	3	4	2	3	3	3	3	3	4	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	4
51	4	1	3	3	2	4	4	1	4	2	3	3	1	4	2	1	4	3	4	4	2	4	2	3
52	3	2	2	2	3	2	4	2	2	3	3	3	2	3	2	1	2	3	3	3	2	3	2	2
53	4	4	4	4	4	3	3	2	3	4	3	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
54	4	3	4	3	2	3	4	2	3	3	4	4	2	3	3	4	4	3	3	4	2	3	4	3
55	4	2	1	1	1	2	3	1	4	3	3	3	3	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	1
56	4	4	4	3	4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
57	3	4	3	3	2	2	1	3	2	4	4	4	3	3	2	4	3	3	3	3	3	3	4	2
58	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
59	4	2	2	1	1	2	4	2	2	3	4	4	3	4	1	4	2	2	2	3	3	3	3	2
60	4	4	4	2	1	2	4	2	4	4	4	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3
61	3	4	4	3	4	3	4	3	4	4	4	4	4	2	4	4	3	2	4	4	4	2	2	3
62	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4
63	4	4	4	3	1	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	4	4	4	4	4	4	4	1
64	3	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	4	1	4	2	4	4	3	4	4	4	1
65	4	4	4	3	3	4	3	4	4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	4	4	3	4	4	1
66	4	4	3	2	4	4	4	3	3	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4
67	3	4	4	4	3	2	3	2	3	4	4	4	2	3	4	1	2	4	4	4	4	4	4	2
68	4	4	4	4	2	4	4	1	4	3	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4
69	4	4	4	1	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	2	4	3	3	3	3	3	3	2	3
70	4	4	3	3	4	3	4	3	4	3	4	1	2	2	4	1	4	4	4	4	4	4	4	1
71	4	2	2	2	1	2	4	1	2	3	3	3	3	3	2	2	1	4	4	4	4	4	3	1
72	4	2	2	1	2	4	4	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	1	3
73	3	4	3	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	3
74	4	3	3	2	2	3	4	3	4	3	4	4	4	3	2	4	4	4	4	3	3	4	2	4
75	4	4	4	3	4	3	4	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
76	4	3	3	3	3	3	4	3	3	4	4	3	3	4	3	4	3	4	4	4	4	3	4	3
77	4	4	4	4	3	3	3	3	4	4	3	2	2	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4	2
78	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	1	2	2	4	1	4	4	4	4	4	3	3	3
79	4	3	3	4	2	3	4	2	4	4	4	4	3	4	4	2	4	4	3	4	4	3	4	2
80	4	4	1	2	1	4	1	4	1	4	4	4	4	3	2	3	4	4	4	4	2	3	4	3
81	3	3	3	2	1	2	3	3	3	4	2	1	1	1	1	2	3	3	4	4	4	3	4	2
82	3	4	2	2	1	3	4	2	3	4	4	3	2	3	2	2	4	4	4	4	4	4	4	1
83	4	2	2	2	2	4	2	2	3	4	3	3	3	2	3	2	4	4	4	4	4	4	2	4
84	3	1	2	2	1	2	4	1	1	3	4	4	3	3	1	4	1	4	4	4	4	4	4	1
85	4	4	4	2	2	4	4	4	4	4	4	3	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3
86	4	2	2	1	3	4	1	3	4	4	4	4	4	4	2	3	3	4	4	4	4	4	2	3
87	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
88	4	2	2	1	2	3	4	3	2	3	4	4	3	4	3	4	1	3	3	4	4	4	4	2

P	Impedancia								Admitancia								Maxwell							
	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>
89	4	4	4	4	1	2	4	3	4	4	4	4	2	4	4	4	4	4	2	4	4	4	1	4
90	4	4	4	4	3	2	4	1	4	4	4	4	3	3	3	3	3	4	4	4	2	3	1	4
91	1	1	3	2	4	2	1	3	2	3	3	3	4	4	2	3	3	3	4	4	3	3	2	4
92	4	2	2	2	1	3	4	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	2	3
93	4	2	1	1	2	3	4	1	3	2	3	2	2	3	3	2	3	4	4	4	4	3	1	3
94	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	4
95	3	4	2	1	2	3	4	2	4	4	4	4	4	3	2	4	4	4	3	4	3	4	4	4
96	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
97	4	1	1	1	1	2	4	1	3	3	3	3	3	4	4	3	3	4	4	4	4	4	2	4
98	3	3	2	2	2	3	4	2	3	3	3	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	2	4
99	4	3	3	3	2	2	3	3	4	3	4	4	4	4	4	3	4	3	3	3	3	4	2	3
100	4	4	4	4	2	3	4	3	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	4	3	3	3	4
101	3	2	3	3	2	2	4	1	2	3	3	4	4	4	2	3	2	3	4	4	4	4	1	4
102	4	4	3	2	1	1	4	2	3	4	4	4	3	3	2	3	2	3	4	4	4	4	1	3
103	2	3	3	3	3	3	4	2	1	4	4	4	4	4	1	3	1	3	4	2	1	1	4	1
104	3	4	4	4	2	3	4	3	3	4	4	4	3	3	3	4	1	4	4	4	4	4	1	4
105	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
106	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
107	4	4	2	2	1	2	4	1	4	3	3	3	3	3	2	4	3	4	3	3	2	3	2	3
108	4	4	4	4	2	4	3	4	3	4	4	3	3	4	2	3	3	4	4	4	4	4	1	1
109	4	3	2	2	2	2	4	2	3	3	2	3	3	3	3	2	4	4	4	4	4	4	2	4
110	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
111	4	4	3	2	1	3	4	3	3	4	4	4	4	3	4	4	3	3	4	4	4	4	2	4
112	4	2	3	2	1	2	1	4	4	3	4	4	3	4	3	2	3	4	3	4	3	4	2	3
113	4	3	2	3	2	3	1	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	2	2	1	2	1	2	2
114	4	4	3	3	2	3	4	2	4	3	4	4	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	2	3
115	4	4	4	3	4	4	4	3	3	4	4	4	3	4	3	3	1	4	4	4	3	4	2	4
116	4	4	2	2	1	1	1	2	3	4	3	3	2	3	2	3	4	4	4	4	4	4	3	4
117	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	1	2	1	2	3	1	2	1	2	2	2	1	2	2
118	4	2	2	1	1	2	4	2	3	4	3	4	4	4	2	4	4	2	3	2	2	3	3	2
119	4	3	2	2	2	4	4	3	4	4	4	4	4	4	2	4	4	3	3	3	3	3	4	4
120	4	3	4	4	3	3	4	3	2	3	3	3	3	4	2	3	2	4	3	3	3	3	3	3
121	4	3	2	3	3	4	4	1	4	4	4	4	3	4	2	4	1	2	2	2	4	3	2	4
122	3	3	4	4	2	3	4	2	3	3	3	4	2	3	3	2	2	3	4	4	4	4	1	4
123	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	3	4	3	4	3	4	4	3	4	3	3	4	4
124	4	3	3	3	1	4	4	1	4	3	3	2	2	2	3	3	4	4	4	4	4	4	3	4
125	4	1	3	4	1	1	4	1	3	2	4	4	2	3	4	1	3	3	4	4	4	4	1	4
126	3	3	2	2	3	3	3	2	3	3	2	3	3	3	2	3	3	3	4	4	4	2	3	3
127	3	3	2	2	1	1	1	1	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	4	3
128	4	4	3	4	2	3	4	1	4	4	3	4	2	4	2	4	4	4	4	4	4	4	1	4
129	4	4	1	1	1	3	4	1	4	4	3	3	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4
130	3	2	3	2	1	3	4	1	4	3	3	4	3	4	2	3	1	2	3	3	4	4	1	4
131	4	3	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4
132	4	3	3	2	1	1	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	4	2	3	3	4	4	1	1

P	Impedancia								Admitancia								Maxwell								
	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>	
133	4	3	4	4	2	2	4	2	1	2	2	2	2	3	3	2	1	2	4	4	3	4	1	4	
134	4	2	2	2	2	1	2	1	3	3	3	2	3	3	3	2	1	4	4	4	4	4	4	1	4
135	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	2	4	2	4	4	4	4	4	4
136	4	4	4	4	3	4	4	4	3	3	3	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	3	3	3	4
137	4	4	3	3	2	3	4	3	4	3	4	4	4	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	2	4
138	3	4	4	4	3	3	2	2	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	3	4	3	3
139	4	2	2	1	2	3	4	3	3	4	4	4	3	3	4	2	2	3	4	4	4	4	4	1	3
140	4	2	3	2	3	4	4	3	4	4	4	3	3	4	2	3	3	4	3	3	4	4	3	3	3
141	4	4	2	3	2	3	4	4	3	4	4	4	3	4	3	4	4	4	4	4	3	3	3	4	4
142	4	4	2	2	1	1	1	1	3	2	2	4	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
143	4	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	3	3	3	4
144	4	3	2	4	2	2	4	1	3	3	3	3	2	4	2	4	4	3	3	3	3	3	4	3	3
145	4	4	2	2	2	2	4	2	3	3	4	4	3	3	3	2	2	4	2	4	2	3	3	1	3
146	3	3	3	3	2	4	4	4	3	3	3	4	4	4	3	2	3	3	2	4	4	4	4	1	4
147	4	3	4	4	3	4	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	3	4	3	4
148	4	1	3	3	1	1	4	1	3	3	3	3	3	3	2	3	2	4	4	4	4	4	4	1	4
149	1	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	3	3	2	2	3	3	3	3	3	4	3	4
150	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

— Índices de desempeño de los participantes —

## Índices de desempeño de los participantes

P	Impedancia				Admitancia				Maxwell			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE	IAE	ISE	ITAE	ITSE	IAE	ISE	ITAE	ITSE
1	44.2040907	62.9765157	1082.01694	1516.35256	28.99906333	31.2322443	600.970272	570.82065	26.1267492	25.692398	581.701057	470.149286
2	34.38765432	43.9547715	771.029372	882.731	23.5567288	19.9072019	594.471193	471.122949	23.5172882	21.5540089	580.471581	551.366082
3	45.88205468	92.1870392	955.822781	1425.07389	29.42827697	31.8634995	690.072102	706.148976	16.9591575	12.2797375	358.78288	244.124968
4	41.95698762	60.8217146	1094.80158	1473.46347	26.73657397	24.1605532	710.47289	653.125224	21.4156851	18.4700238	538.576947	421.668537
5	83.94503963	245.051814	2059.57358	5201.69249	33.14039836	37.311354	798.297992	876.487498	28.1480359	26.6562728	606.953237	518.742797
6	51.61653051	94.2281558	1270.44177	2238.12206	49.17940501	86.8720742	1186.54519	2067.35532	25.0968913	23.876628	495.482994	367.846898
7	55.19524288	94.7518192	1442.2435	2341.68174	26.96773447	30.1682612	588.968905	539.51356	35.0360535	44.5198579	847.535252	808.828178
8	51.1418648	76.5271618	1337.85591	1805.37066	33.24303668	41.894313	729.912832	709.282249	30.6233982	33.2917747	658.73381	630.965278
9	45.41366396	81.7444281	1097.85782	1721.73632	28.69415321	29.4028346	710.586265	717.803647	27.5385546	28.5671641	681.980133	707.694466
10	40.61894517	57.3527849	974.19206	1241.61409	31.29352087	34.8460028	851.818642	936.713992	22.2036607	18.056275	489.609455	376.724681
11	73.38423091	204.956718	1622.39236	3888.2379	42.55197471	62.2841067	1133.38602	1801.90438	31.1447889	32.2062773	694.798509	683.168946
12	47.5649799	79.8777706	1248.51596	2071.52716	44.59834818	78.4872583	895.735234	1167.04202	28.6217328	26.0117054	628.28735	532.713688
13	43.90203138	61.1805443	1179.08063	1659.85754	27.91429483	26.2814441	709.153927	714.220781	38.4686506	54.2456686	852.337946	1054.66825
14	49.91358625	94.772868	1129.49469	2112.00819	51.08434712	92.7882523	1299.46611	2459.60748	33.7260623	43.8672861	785.763867	972.010893
15	45.19679689	82.8663129	973.547352	1404.46001	21.38689509	16.184369	461.062633	303.715815	16.8119149	9.61613674	409.258978	272.264201
16	36.6070499	54.4855999	960.685961	1487.25178	30.6365079	32.9039535	809.791791	907.546879	25.0337267	24.8031109	561.6329578	516.331899
17	62.95918753	161.281162	1632.50303	4432.47957	38.00257641	51.3604243	1012.64991	1436.23366	23.7244729	21.1086337	561.509568	471.126365
18	66.9006826	249.108867	1468.23	4296.14666	26.02898179	22.883491	635.168089	548.003895	32.9590905	37.9790159	780.529475	851.808383
19	62.02413279	134.444464	1503.78871	3201.98438	44.2746377	71.7211973	1087.09562	1758.71923	33.008571	38.1469295	765.355799	885.94356
20	47.57009512	95.1870027	1013.39377	1507.92613	35.49437751	43.0452403	863.867727	1013.38022	23.8399274	22.2189472	512.411037	404.682472
21	55.9379486	103.300458	1336.40184	2311.68236	49.68589696	86.1930729	1220.69227	2087.71702	32.7146163	35.701466	773.389796	812.828085
22	38.74325263	57.4734568	844.496136	1076.03911	37.34628407	48.1300851	869.606308	1059.27596	52.6785878	100.717266	1326.22611	2609.54543
23	68.27202073	143.935657	1620.16009	2952.71086	82.60255086	337.443271	1493.32697	4260.76365	30.4109512	34.5127241	737.134505	824.024233
24	48.41769283	89.4716446	1168.36257	1947.34157	25.88786223	22.3259965	606.423926	504.519806	24.9915882	24.0458602	572.322531	524.974201
25	47.0252116	63.4208774	1389.50961	1716.97381	16.19796305	10.3657007	405.486714	250.516409	25.4874428	20.9879324	624.519438	483.503684
26	38.31838685	51.5885187	940.411282	1226.49842	22.89265881	18.3763749	506.537592	368.942647	20.7310523	15.3339647	495.323263	365.505437
27	41.49626	79.8973996	897.761606	1469.321	44.48590896	80.0797546	1128.76703	2060.02093	20.3117043	13.9310488	455.767572	300.018884
28	54.7471989	98.767824	1379.34431	2403.03128	26.13880515	19.8893453	691.551801	851.907238	23.4132853	18.6977466	570.904169	443.784516
29	73.5874248	177.594776	1875.34983	4421.55536	34.23521527	50.8534085	696.457733	880.497834	13.3967863	9.11572117	335.987137	236.699724
30	37.92314344	57.1106877	788.295427	1021.41324	43.59198231	58.8604752	1118.30847	1491.98332	21.8181033	16.7610939	507.838634	770.398176
31	37.88073517	50.71071441	1022.2237	1330.05734	28.88006358	27.2157991	642.316891	531.456372	23.6280488	14.502868	601.82562	565.917745
32	35.51298305	47.6528955	800.427974	1012.28246	27.69124024	29.3547551	695.186709	637.581218	20.7667208	14.9658146	495.806236	345.462339
33	55.91815216	112.0452	1355.43626	2619.79693	21.6986959	17.924448	508.586247	373.092612	28.5941244	27.522357	677.877423	638.890229
34	48.2288591	81.1717346	1234.86046	1969.93212	25.71646265	13.2562846	591.926571	516.588194	27.9274502	30.229679	677.326137	632.81288
35	57.91820947	102.528312	1378.375	2178.60663	32.90199677	34.837993	837.760522	864.653169	20.3726736	14.9748077	491.382122	360.35279
36	27.39320401	25.4214722	688.248338	647.84596	50.75048518	94.3767175	1135.96476	1827.91999	49.2314111	93.8615597	1177.51236	2244.08304
37	60.4560149	135.957949	1681.07725	3884.09366	19.87807908	14.2051846	479.814999	317.492465	24.6788384	23.4161557	522.890033	410.745977
38	56.05549397	106.781111	1398.98436	2637.94877	19.467828	13.1589098	453.345469	299.879293	34.2149103	44.214024	764.622478	862.299541
39	40.10739683	56.9518094	935.084793	1191.15389	31.06468097	33.0073282	799.781816	912.004992	19.9112161	11.8130971	607.392003	417.276505
40	65.66867033	126.833586	1808.22678	3408.50495	34.59511432	50.7805874	866.330241	1288.71745	27.8940016	28.1846241	680.161938	643.205974
41	40.38857846	55.6636485	1199.59869	1754.78853	29.28170383	32.8293426	690.248118	764.888894	32.2419094	34.5230834	789.560027	862.635604
42	55.43816231	116.278101	1206.31036	2089.27343	56.74124844	115.168772	1305.30541	2516.74222	29.0265893	31.1380637	686.63752	765.862376
43	50.63449677	94.2552577	1219.12819	2079.65556	24.19691028	20.8145319	633.577425	546.114448	32.0546928	37.8902954	655.414536	687.878796
44	55.28979735	117.214256	1178.24169	2147.69159	32.47436243	37.8206717	762.257764	761.510226	25.0473624	25.7615839	482.415256	392.224555
45	47.85624134	84.1790916	1126.76568	1801.26276	28.14585659	27.3038782	665.897984	623.349331	18.6156002	11.5697727	461.015039	283.605931
46	43.3044601	61.352737	1107.90564	1333.26473	27.82575466	28.6022796	741.258157	762.130854	20.0670386	16.2398063	529.086247	448.832925
47	45.18570193	81.0632572	1007.73876	1510.08316	29.9648749	34.1694854	689.263348	744.620576	40.4118827	53.1579119	977.959084	1282.26097
48	66.81808215	158.718258	1828.63586	4383.05682	32.68551833	40.189415	872.472266	1180.74263	23.4268297	21.9781382	589.106423	568.33699
49	37.21790654	51.276182	954.617363	1285.2113	33.21793052	35.7925855	810.710691	893.681765	27.8961086	32.8362744	609.804747	595.992862
50	48.70972706	95.0788075	1170.4289	2326.78665	29.05484425	36.6771021	714.954075	956.84311	21.8135028	23.2386902	460.966702	465.758241
51	70.45277805	187.482736	1478.26019	3338.3496	43.25198866	63.3120516	1067.76021	1572.19519	44.5850877	70.1605808	1150.18508	1887.28038
52	44.55726963	70.8576071	1024.45598	1469.51916	27.69623064	25.2383221	642.564754	548.819893	33.8016762	54.5469268	625.795871	721.497852
53	41.44543835	58.9302041	939.711064	1210.18236	18.09934	13.3214232	457.458796	335.727563	13.7690251	6.94840752	335.726339	164.963483
54	66.09456885	139.089313	1929.32017	3996.52899	23.36739502	17.8184321	541.168907	388.621499	20.0822481	17.5251323	393.564114	278.51783
55	42.84461816	57.6120302	1141.67634	1528.1512	31.51811251	38.2093131	719.001547	771.239646	16.0509975	9.23183805	344.892923	183.541667
56	43.5546512	66.9292407	1120.46597	1722.75234	66.03161082	155.924972	1422.32583	2798.00306	26.6117046	27.4014632	598.359618	537.126713
57	65.18574633	140.956797	1718.0207	3786.37104	21.76017216	14.4501099	518.890333	330.163184	58.5565288	176.599471	1044.34868	2390.18101
58	45.44980028	64.3830587	1157.34266	1562.17287	32.93112743	42.3865852	759.728664	892.669168	22.9154191	18.3893695	515.812681	358.826483
59	56.69119708	133.259851	1400.78535	3108.05629	29.12448673	26.6607288	798.173826	768.177655	16.9074794	10.4250236	413.241295	255.368434
60	44.14890456	64.2781762	1349.53708	2097.22124	18.95626622	13.0156298	551.59294	424.822117	16.5065057	9.65344378	373.779257	195.242564
61	64.96966118	142.659516	1525.39973	3068.33503	22.55979613	19.595052	487.376673	365.965503	25.4452146	22.6508941	598.088769	508.766091
62	49.23463705	95.5638644	1086.98344	1797.39956	28.24460008	28.2954848	696.382813	654.05756	26.291417	23.2652868	573.327502	450.4419
63	60.5886103	128.227122	1451.19575	2637.19235	45.27521414	75.8825225	1031.1657	1604.36376	25.3802475	28.1979871	644.368975	754.459262
64</												

## Índices de desempeño de los participantes

P	Impedancia				Admitancia				Maxwell			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE	IAE	ISE	ITAE	ITSE	IAE	ISE	ITAE	ITSE
68	58.48678173	115.865863	1326.41868	2131.67045	19.15943855	12.5644101	478.131036	315.818375	16.7461067	10.9830784	386.053877	245.627755
69	57.46775901	108.597779	1347.35858	2413.89849	28.32748273	26.2078549	714.584757	574.899298	15.8169089	9.71719432	360.0565	192.946266
70	34.60891075	38.5349985	784.006471	790.171983	25.42905453	22.2001243	618.53488	526.713014	29.1130929	29.0359948	833.031033	888.595278
71	42.59929261	57.2754383	1173.30637	1531.5137	22.13992108	17.3600988	525.263045	392.467832	22.534523	20.852803	498.197735	413.825871
72	54.89370614	78.1195489	1632.01314	2048.7623	25.14544573	26.2210212	511.364243	405.258213	23.6633241	20.6874511	535.644785	423.208805
73	50.20853471	86.8720374	1460.35106	2678.84053	21.00146529	16.515575	540.064065	430.917946	13.8768863	7.85780275	330.407443	178.743238
74	70.1393774	167.940472	1567.67519	3155.88417	29.22942026	34.2442308	686.313397	791.612412	25.9803288	28.6164202	544.443079	539.65577
75	54.03792748	127.685517	1346.93823	2797.40057	29.42450223	28.408975	756.049688	743.368434	57.7023014	154.467111	1156.68062	2550.61404
76	20.35120158	15.8533529	494.144938	376.361384	44.6267539	73.9212039	1196.36265	2069.2982	23.772617	18.9691701	582.943474	471.463102
77	55.97711002	106.478189	1438.88377	2625.27753	63.35106437	146.573339	1688.071	3948.17274	81.5416066	227.663683	2217.27011	6624.16559
78	46.78578508	73.7312553	1284.72317	2035.46055	26.17831997	23.038758	624.383687	515.999615	33.7725446	42.8597539	717.25823	774.670261
79	41.76273658	61.8975876	960.396934	1222.29258	20.12231984	14.3523378	510.345491	382.267043	21.6150021	16.3783786	494.182104	351.211432
80	49.8640519	82.9035778	1367.65471	2315.85785	24.15891506	19.2190614	624.157476	481.041274	33.4762286	42.3348832	787.215636	965.386931
81	47.19179299	87.5905577	1053.42814	1679.47915	31.58745128	32.2422977	793.072264	802.106886	26.7445393	25.1645748	640.204766	569.945534
82	47.50948741	80.4557775	1169.52839	1641.28853	38.84614449	56.6450218	893.196203	1030.30254	42.0016932	106.102806	833.517006	1379.6129
83	46.42123716	78.4294121	1114.22841	1734.57736	36.04238406	43.8644952	886.592386	1071.81433	24.5273634	27.0178066	595.809514	523.866898
84	62.62802638	122.852262	1577.19496	2923.30018	20.94817124	16.292768	494.559261	349.984041	17.342803	10.083894	418.131405	250.839508
85	42.79467309	59.0232664	1104.55872	1553.58707	82.56843038	414.053451	1355.49054	4813.23813	50.4017836	124.724042	999.740561	1889.87838
86	46.73080263	82.3516605	1079.67123	1704.62672	39.55578921	61.4719917	1074.75002	1799.55439	31.5434784	37.4756731	740.604528	827.503044
87	83.04308865	221.750243	2261.92553	5922.27395	42.25558375	58.1001748	1011.35574	1335.8971	36.9065608	52.3403155	886.505137	1280.17293
88	53.89791406	98.4777889	1252.52552	2103.34776	20.37832339	15.2650689	544.365969	451.683035	27.0107911	26.6457925	607.129866	524.934608
89	49.33748874	77.8281059	1248.81705	1831.43741	25.76695612	21.9193772	604.058278	460.47222	23.4970634	20.7787035	534.285236	419.470096
90	43.37066743	71.8873817	1035.94804	1482.68596	23.1999319	19.9969916	542.033087	435.700632	25.5565122	26.6484591	499.752952	435.910687
91	41.15973344	56.9301989	950.497737	1157.67309	22.47151267	19.7391648	640.216176	640.106972	19.0526684	12.2079983	451.137605	278.81669
92	44.78514826	70.9934939	1122.41114	1830.95962	29.19700617	30.1548278	633.869387	586.546669	46.5046796	83.5313808	981.477405	1418.72763
93	44.04018247	67.2024708	1158.57551	1810.23814	34.33057138	37.1367182	920.637701	1012.62943	27.181405	26.3599617	612.930773	533.856856
94	215.7852678	1338.92422	6750.66793	42221.4907	84.30122104	320.015716	1800.82221	6240.71375	103.411589	356.873186	2667.03453	8138.97266
95	54.36035452	96.0493741	1260.69496	2344.69173	25.60850693	22.2643334	649.365382	533.178902	29.2770473	31.8652119	816.396615	910.413544
96	56.56779464	94.4878696	1501.22172	2301.4339	28.57743199	29.2104968	728.075527	726.912483	23.0895093	20.0833076	572.070101	509.567424
97	35.55196579	55.1005514	761.372641	848.306258	17.23729841	10.1048608	451.466018	288.912839	19.8286878	17.7374117	406.493907	282.500818
98	56.83899836	93.1799401	1489.85082	2377.05961	67.34805532	171.570713	426.538799	4311.94837	43.8340173	82.321676	1161.88668	2430.41611
99	54.6179483	99.2966988	1367.6363	2136.36711	24.89801425	22.4531957	589.743493	517.849071	19.3273329	14.3072211	512.214319	255.396281
100	47.48581742	61.0750211	1465.41904	1831.53134	24.8921378	21.6519745	1050.309886	473.12269	22.0465329	17.4581957	610.941865	382.465316
101	34.84605232	46.4251311	786.260778	882.991907	29.94761977	31.9015295	697.908674	692.29856	27.9014324	30.0027765	663.145645	667.807138
102	41.62396733	57.6145598	1132.02743	1662.57589	58.29666119	115.811476	1455.81331	2981.38678	33.5973731	42.5598152	803.107143	1003.18553
103	37.20151853	50.789514	1017.53356	1380.08604	34.59626023	41.1514596	809.251498	890.671042	21.2042394	14.6584227	545.43128	388.943807
104	42.59704668	68.5947579	983.887514	1396.73678	36.98305117	41.7989694	1129.45868	1374.91715	23.9491546	20.7951316	601.400793	539.178796
105	43.70081623	65.36878	1122.30286	1387.51856	23.29284796	17.9798796	611.581254	494.060952	23.8338462	20.1644928	542.430674	434.737154
106	64.59193975	149.228387	1621.44154	3545.91044	63.9821597	145.951112	1635.61488	3866.57256	55.6271804	102.508768	1458.68353	2755.35685
107	49.47421535	76.2177453	1256.79037	1730.70355	19.79490453	14.7427367	490.963633	371.604184	24.2918141	25.1888241	599.17736	586.116905
108	39.3805997	47.0931399	1060.31131	1236.83975	16.84190259	10.4825849	426.538799	273.765533	18.1901554	13.7216064	388.814481	239.542099
109	51.67013977	84.8997568	1435.12107	2360.57295	17.71649345	10.6556012	452.590768	255.704479	19.12351	13.7089602	434.757919	293.338014
110	60.58999866	130.123269	1503.17371	3095.69363	29.86291948	30.7024256	765.715078	807.962559	35.2194561	54.3550126	721.886337	873.928318
111	53.88849102	96.039857	1440.22218	2650.04278	44.44894118	87.4604111	936.193141	1454.96824	17.1883039	10.1681014	407.566482	237.381828
112	60.83032943	115.995755	1510.51772	2674.29766	18.28465053	11.101496	430.026833	231.50488	18.5809995	14.218967	398.442148	258.910969
113	50.41512106	94.7591051	1211.59186	2318.50709	60.21675094	113.395764	1446.36527	2646.34205	36.0739885	42.6664082	818.38399	864.731401
114	56.74420249	121.352518	1263.16899	2308.08738	40.19059043	49.3012543	942.585123	1111.24997	28.1396424	26.5755873	711.416541	663.925502
115	80.26878961	225.25309	1844.76656	4463.74905	89.20529421	274.317923	2445.40042	7455.1064	50.8247438	96.9204971	1209.44344	2340.14908
116	54.77603028	103.736641	1437.98368	2764.94026	22.63772027	22.2281631	563.238364	589.885187	20.726344	15.6812687	471.700994	350.818048
117	48.60634688	80.8597577	1073.8081	1666.84524	26.76749293	28.3238658	650.59338	680.412244	31.4397528	36.4589631	750.826671	856.192946
118	192.2324128	1042.97289	4987.79752	22956.6736	43.51270145	84.0491855	1056.71557	1993.46899	25.5341795	22.9394111	631.083728	549.769242
119	42.43987567	60.9074346	1032.23785	1370.55062	39.63296293	62.6172205	816.972464	1083.24342	35.1494838	46.465294	813.548193	997.121593
120	45.73995168	74.3905233	1203.87601	1793.54233	23.10443114	17.1693887	573.601188	431.299446	29.7641372	32.2231474	676.493214	646.293479
121	48.48469018	83.5601211	1136.00671	1743.06148	24.73464323	18.6884288	592.61982	432.432082	20.8124591	16.8786098	459.376796	346.649004
122	60.40314417	111.373403	1640.14999	2962.88814	49.31456769	84.3423544	1014.27356	1480.96553	34.5320925	40.7879619	875.004446	1086.87982
123	40.96329858	50.9542879	1111.27095	1373.80585	31.24640388	40.4206398	607.709138	663.644559	20.9318217	15.2160375	499.816419	551.916053
124	61.78682693	125.438082	1512.46962	2695.91988	32.09008242	35.8891117	855.763016	1039.51117	32.6505079	43.3704621	864.11298	1099.60532
125	62.596587	122.586576	1815.45307	3662.39584	22.31775782	17.7652899	609.67967	504.206211	24.034317	22.1042637	529.269625	455.6273
126	49.78529821	83.2705679	1170.61647	1886.25728	27.19791787	24.0727795	719.141837	680.794768	22.0493477	18.5886845	576.720136	518.192684
127	36.19931523	42.9907348	922.107273	989.795149	20.74914025	15.9888566	502.707051	376.420211	21.8906286	19.8494746	449.466336	337.364324
128	52.24089591	91.2182592	1391.03585	2345.0056	22.48849608	16.8844094	544.143399	395.030361	17.083865	10.0352991	376.394207	195.457577
129	38.87606277	60.5714328	824.032387	987.082578	18.28620176	12.1092092	409.860068	221.043291	22.510718	20.1491484	467.16715	342.229186
130	42.70202223	69.4994215	972.900984	1384.56456	23.12719015	21.5182732	522.518885	434.044861	25.775			

## Índices de desempeño de los participantes

P	Impedancia				Admitancia				Maxwell			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE	IAE	ISE	ITAE	ITSE	IAE	ISE	ITAE	ITSE
135	53.63370774	97.9281413	1278.05504	2272.8246	20.37272554	14.0995812	530.349877	384.628807	22.5086445	20.6442467	555.891505	526.73563
136	54.69762161	86.4726303	1548.86392	2311.42466	31.65155212	43.5856251	632.752167	665.066726	20.7928253	15.4067611	472.300395	319.947822
137	53.07367691	89.2049651	1331.50958	2134.76629	36.71723765	47.7462566	827.628927	1082.61414	18.6975727	11.5175059	441.803108	263.008897
138	55.55961514	110.65455	1384.8589	2684.29062	29.51134951	36.3545947	764.819401	995.345285	27.4745637	29.2648526	611.62126	597.691211
139	39.18598489	57.3971258	1010.89022	1449.47878	24.73472552	22.391458	528.645051	426.445298	23.0468465	20.4830725	590.684195	549.942438
140	44.0710679	70.6429871	1058.25654	1549.71897	35.19370448	41.2902709	842.126518	954.23203	20.7914811	16.1550877	522.168551	403.90319
141	82.14607372	307.610336	1746.94288	4946.02102	51.21083309	97.296138	1121.70451	1934.79843	32.4957184	33.8914186	744.349396	691.718494
142	52.81749308	91.2718831	1318.09556	2202.82463	47.23316851	72.1795404	1200.18434	1878.64178	55.30944	119.156419	1409.37098	3060.58697
143	57.85546331	116.115306	1314.53747	2444.74327	35.25948663	48.0580586	743.16459	735.524526	23.9763098	19.0743152	529.788688	376.440918
144	64.66924197	166.731995	1409.52253	2809.40158	24.26879091	19.1268088	626.544522	402.323694	20.8406047	16.9119367	454.354746	344.660747
145	50.05204582	80.7861196	1230.2871	1896.78372	36.02478678	43.4628656	867.43598	962.657199	27.3492006	26.9132932	663.229918	652.055695
146	53.43446461	84.3237243	1427.51363	2147.86546	39.2108819	54.7997656	872.666762	1052.12774	44.173525	66.4840869	1037.53679	1463.43385
147	58.2791576	134.065394	1305.72403	2426.07564	23.42130257	18.7592304	628.502666	500.874794	18.0680287	11.025382	463.173101	284.730363
148	34.28638415	39.5486969	896.500403	1034.95478	17.02737242	10.7478593	373.705421	215.311297	17.5807411	12.96711	365.632381	222.552648
149	41.6684949	61.7215738	1046.28938	1566.72002	29.60282066	33.3418212	738.310656	795.751708	23.384062	21.3389966	507.238219	420.382001
150	57.3622284	121.242464	1342.61952	2817.24735	24.4085115	22.1006977	619.315711	564.935603	26.1681868	27.1190663	606.160838	567.461228

---

# Códigos de Matlab

---

## Código de adquisición y clasificación de datos.

```
clc
close all
% Captura de datos del sujeto =====
Name='Nombre del participante ';
Ctr3=" Control de impedancia";
Ctr1=" Control de admitancia";
Ctr2=" Control Maxwell";
% Creacion de carpeta y base de datos =====
Name_file=strcat(Name, '.xlsx ');
T=table(out.Var1, out.Var2, out.Var3, out.Var4);
mkdir(Name) %Creacion de carpeta
save_table = strcat('C:\Users\Fer-P\OneDrive\Documents\Maestria\Tesis ...
\Simulaciones de MatLab\Lectura de datos\' ,...
Name);
table_path_format = fullfile(save_table, Name_file);
writetable(T, table_path_format);

s1 = strcat(Name, Ctr1);
s2 = strcat(Name, Ctr2);
s3 = strcat(Name, Ctr3);
%=====

% Lectura de datos =====
t=out.Var1; % Tiempo
X=out.Var2; % Posicion
Xd=out.Var3; % Posicion deseada
f=out.Var4; % Fuerza
[row, col]=find(ismember(out.Var3,30)); % Identificador

% Tiempos de inicio y fin de cada control =====
t_value_Ctrl1=out.Var1(row(1),1);
t_value_Ctrl2=out.Var1(row(3),1);
t_value_Ctrl3=out.Var1(row(5),1);

row(1)=row(1)+1; %
row(2)=row(2)-1; %
row(3)=row(3)+1; %
row(4)=row(4)-1; %
row(5)=row(5)+1; %
row(6)=row(6)-1; %
```

## Códigos de Matlab

---

```
%-----
Length1 = row(2) - row(1); % Longitud marcador 1
Length2 = row(4) - row(3); % Longitud marcador 2
Length3 = row(6) - row(5); % Longitud marcador 3

% Calculo de los datos de los controladores =====

% Control 1 -----
t_Ctrl1 = t(row(1):row(2)) - t_value_Ctrl1;
f_Ctrl1 = f(row(1):row(2));
Xd_Ctrl1 = Xd(row(1):row(2));
X_Ctrl1 = X(row(1):row(2));
% Control 2 -----
t_Ctrl2 = t(row(3):row(4)) - t_value_Ctrl2;
f_Ctrl2 = f(row(3):row(4));
Xd_Ctrl2 = Xd(row(3):row(4));
X_Ctrl2 = X(row(3):row(4));
% Control 3 -----
t_Ctrl3 = t(row(5):row(6)) - t_value_Ctrl3;
f_Ctrl3 = f(row(5):row(6));
Xd_Ctrl3 = Xd(row(5):row(6));
X_Ctrl3 = X(row(5):row(6));

% Plot de graficas =====

filename1 = fullfile(save_table, Ctrl1);
filename2 = fullfile(save_table, Ctrl2);
filename3 = fullfile(save_table, Ctrl3);

% Control 1 -----
Q(1)=figure('Name',s1);
subplot(2,1,1)
plot(t_Ctrl1, f_Ctrl1, 'Color', [0.9290 0.6940 0.1250]);
title('Applied Force');
xlabel('t [sec]');
ylabel('F [N]');
legend('f-force');
subplot(2,1,2)
plot(t_Ctrl1, X_Ctrl1, 'r', t_Ctrl1, Xd_Ctrl1, 'b--');
title('Trajectory tracking');
xlabel('t [sec]');
ylabel('F [N]');
ylabel('x [cm]');
legend('X-position', 'Xd-desired position');
%exportgraphics(Q(1), filename1, 'Resolution', 500);

table_path_format_Ctrl1 = fullfile(save_table, strcat('1.', Ctrl1, '.xlsx'));
T_Ctrl1=table(t_Ctrl1, X_Ctrl1, Xd_Ctrl1, f_Ctrl1);
writetable(T_Ctrl1, table_path_format_Ctrl1);

% Control 2 -----
Q(2)=figure('Name',s2);
subplot(2,1,1)
plot(t_Ctrl2, f_Ctrl2, 'Color', [0.9290 0.6940 0.1250]);
title('Applied Force');
xlabel('t [sec]');
ylabel('F [N]');
legend('f-force');
subplot(2,1,2)
plot(t_Ctrl2, X_Ctrl2, 'r', t_Ctrl2, Xd_Ctrl2, 'b--');
title('Trajectory tracking');
xlabel('t [sec]');
ylabel('F [N]');
ylabel('x [cm]');
legend('X-position', 'Xd-desired position');
```

```

%exportgraphics(Q(2),filename2,'Resolution',500);

table_path_format_Ctrl2 = fullfile(save_table, strcat('2.',Ctrl2,'.xlsx'));
T_Ctrl2=table(t_Ctrl2,X_Ctrl2,Xd_Ctrl2,f_Ctrl2);
writetable(T_Ctrl2,table_path_format_Ctrl2);

% Control 3 -----
Q(3)=figure('Name',s3);
subplot(2,1,1)
plot(t_Ctrl3,f_Ctrl3,'Color',[0.9290 0.6940 0.1250]);
title('Applied Force');
xlabel('t [sec]');
ylabel('F [N]');
legend('f-force');
subplot(2,1,2)
plot(t_Ctrl3,X_Ctrl3,'r',t_Ctrl3,Xd_Ctrl3,'b--');
title('Trajectory tracking');
xlabel('t [sec]');
ylabel('F [N]');
ylabel('x [cm]');
legend('X-position','Xd-desired position');
%exportgraphics(Q(3),filename3,'Resolution',500);

table_path_format_Ctrl3 = fullfile(save_table, strcat('3.',Ctrl3,'.xlsx'));
T_Ctrl3=table(t_Ctrl3,X_Ctrl3,Xd_Ctrl3,f_Ctrl3);
writetable(T_Ctrl3,table_path_format_Ctrl3);

%Calculo de errores =====

e1=Xd_Ctrl1-X_Ctrl1;
e2=Xd_Ctrl2-X_Ctrl2;
e3=Xd_Ctrl3-X_Ctrl3;

IAE1=trapz(t_Ctrl1,abs(e1));
ISE1=trapz(t_Ctrl1,(e1).^2);
ITAE1=trapz(t_Ctrl1,t_Ctrl1.*abs(e1));
ITSE1=trapz(t_Ctrl1,t_Ctrl1.*(e1).^2);
e_Ctrl1=[IAE1;ISE1;ITAE1;ITSE1];

IAE2=trapz(t_Ctrl2,abs(e2));
ISE2=trapz(t_Ctrl2,(e2).^2);
ITAE2=trapz(t_Ctrl2,t_Ctrl2.*abs(e2));
ITSE2=trapz(t_Ctrl2,t_Ctrl2.*(e2).^2);
e_Ctrl2=[IAE2;ISE2;ITAE2;ITSE2];

IAE3=trapz(t_Ctrl3,abs(e3));
ISE3=trapz(t_Ctrl3,(e3).^2);
ITAE3=trapz(t_Ctrl3,t_Ctrl3.*abs(e3));
ITSE3=trapz(t_Ctrl3,t_Ctrl3.*(e3).^2);
e_Ctrl3=[IAE3;ISE3;ITAE3;ITSE3];

% Creacion de una hoja de datos de los errores -----
errores=["IAE";"ISE";"ITAE";"ITSE"];
table_path_format_error = fullfile(save_table, 'errores.xlsx');
t_e=table(errores,e_Ctrl1,e_Ctrl2,e_Ctrl3);
TPU = renamevars(t_e,["e_Ctrl1","e_Ctrl2","e_Ctrl3"],[Ctrl,Ctrl2,Ctrl3]);
writetable(TPU,table_path_format_error);

% CREAR ARCHIVO PARA CADA CONTROL

%Grafica completa=====
Q(4)=figure('Name','All controls');
subplot(2,1,1)

```

```
plot(t,f);
title('Applied Force');
xlabel('t [sec]');
ylabel('F [N]');
legend('f-force');

subplot(2,1,2)
plot(t,X,'r',t,Xd,'b--');
title('Trajectory tracking');
xlabel('t [sec]');
ylabel('F [N]');
ylabel('x [cm]');
legend('X-position','Xd-desired position');

exportgraphics(Q(4),fullfile(save_table,'All_controls.png'),'Resolution',500);

%=====
fprintf('LISTO')
```

## Código para el calculo individual de los indices de desempeño

```
clear all
clc

y1=readtable('Nombre del participante_error.xlsx');

RefPosition=y1(:,3);
ActualPosition=y1(:,2);
t=y1(:,1);

e=RefPosition-ActualPosition;

IAE=trapz(t,abs(e));
ISE=trapz(t,(e).^2);
ITAE=trapz(t,t.*abs(e));
ITSE=trapz(t,t.*(e).^2);
```

## Código para la lectura de datos individuales

```
T=table(out.DATOS.time, out.DATOS.signals.values);
writetable(T,'FER.xlsx');
```

## Código para el análisis de datos individual

```
clc
clear all
Name='Nombre del participante';
Ctr1='-Control de impedancia.png';
Ctr2='-Control de admitancia.png';
Ctr3='-Control Maxwell.png';

s1 = strcat(Name,Ctr1);
s2 = strcat(Name,Ctr2);
s3 = strcat(Name,Ctr3);
%=====
y1=readtable('Nombre del participante_imp.xlsx');
t1=y1.Var1; % Tiempo
```

```
X1=y1.Var2;      % Posicion
Xd1=y1.Var3;     % Posicion deseada
f1=y1.Var4;      % Fuerza

y2=readtable('Nombre del participante_adm.xlsx');
t2=y2.Var1;      % Tiempo
X2=y2.Var2;      % Posicion
Xd2=y2.Var3;     % Posicion deseada
f2=y2.Var4;      % Fuerza

y3=readtable('Nombre del participante_max.xlsx');
t3=y3.Var1;      % Tiempo
X3=y3.Var2;      % Posicion
Xd3=y3.Var3;     % Posicion deseada
f3=y3.Var4;      % Fuerza
%=====
Q(1)=figure('Name',s1);
subplot(2,1,1)
plot(t1,f1);
title('Applied Force');
xlabel('t [sec]');
ylabel('F [N]');
legend('f-force');

subplot(2,1,2)
plot(t1,X1,'r',t1,Xd1,'b-');
title('Trajectory tracking');
xlabel('t [sec]');
ylabel('F [N]');
xlabel('x [cm]');
legend('X-position','Xd-desired position');

exportgraphics(Q(1),s1,'Resolution',500);
%=====
Q(2)=figure('Name',s2);
subplot(2,1,1)
plot(t2,f2);
title('Applied Force');
xlabel('t [sec]');
ylabel('F [N]');
legend('f-force');

subplot(2,1,2)
plot(t2,X2,'r',t2,Xd2,'b-');
title('Trajectory tracking');
xlabel('t [sec]');
ylabel('F [N]');
xlabel('x [cm]');
legend('X-position','Xd-desired position');

exportgraphics(Q(2),s2,'Resolution',500);
%=====
Q(3)=figure('Name',s3);
subplot(2,1,1)
plot(t3,f3);
title('Applied Force');
xlabel('t [sec]');
ylabel('F [N]');
legend('f-force');

subplot(2,1,2)
plot(t3,X3,'r',t3,Xd3,'b-');
title('Trajectory tracking');
xlabel('t [sec]');
ylabel('F [N]');
xlabel('x [cm]');
legend('X-position','Xd-desired position');
```

```
exportgraphics(Q(3),s3,'Resolution',500);  
%
```

---

## Circuitos electrónicos

Se diseñó una placa con componentes para el acondicionamiento, recepción y envío de señales (véase Figura E.1). Esta se encarga de recibir el voltaje de la fuente de alimentación y distribuirlo a las terminales respectivas de cada componente.

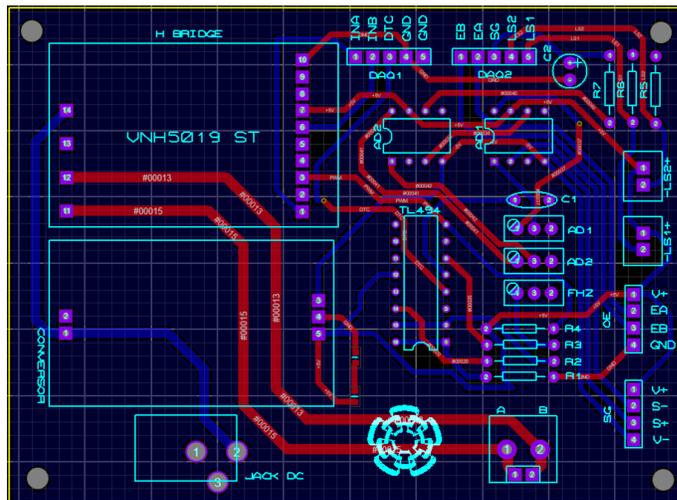


Figura E.1: Placa electrónica

Ya que la tarjeta de adquisición de datos solo puede enviar señales analógicas, se utilizó el generador de PWM TL494 configurado como se ve en la Figura E.2. De esta forma es posible hacer la conversión de 5v analógicos entregados por la tarjeta a PWM con una frecuencia de muestreo de 3000 Hz.

Para la amplificación de la señal del sensor de fuerza se utilizó el arreglo de amplificadores operacionales mostrado en la figura E.3 basado en el integrado AD620.

El puente H utilizado es un VNH5019, su diagrama de conexión se muestra en la figura

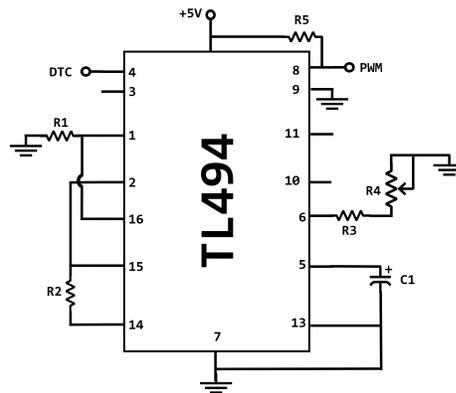


Figura E.2: Configuración del integrado TL494.

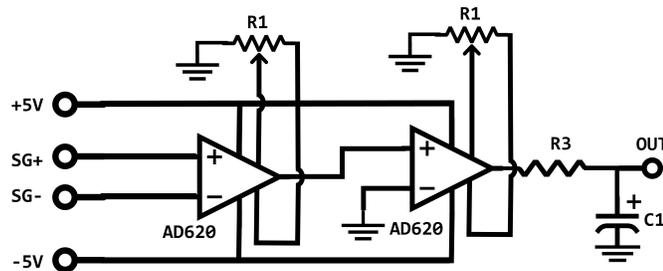


Figura E.3: Configuración de amplificadores operacionales para el sensor de fuerza.

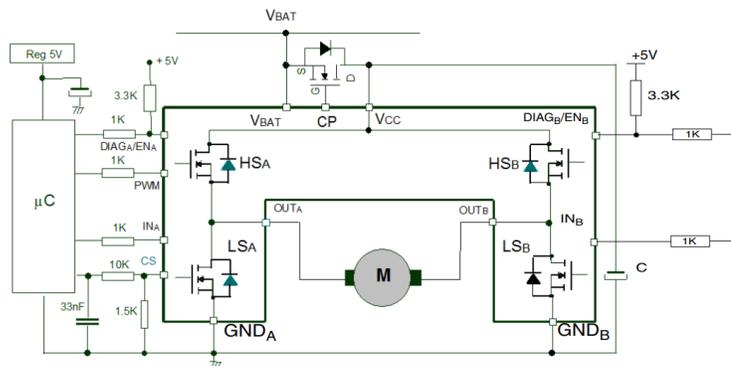


Figura E.4: Diagrama del puente H (VNH5016)

TL494 Pulse-Width-Modulation Control Circuits

1 Features

- Complete PWM Power-Control Circuitry
- Uncommitted Outputs for 200-mA Sink or Source Current
- Output Control Selects Single-Ended or Push-Pull Operation
- Internal Circuitry Prohibits Double Pulse at Either Output
- Variable Dead Time Provides Control Over Total Range
- Internal Regulator Provides a Stable 5-V Reference Supply With 5% Tolerance
- Circuit Architecture Allows Easy Synchronization

2 Applications

- Desktop PCs
- Microwave Ovens
- Power Supplies: AC/DC, Isolated, With or Without PFC
- Server PSUs
- Solar Micro-Inverters
- Washing Machines: Low-End and High-End
- E-Bikes
- Power: Telecom/Server AC/DC Supplies: Dual Controller: Analog
- Smoke Detectors
- Solar Power Inverters

3 Description

The TL494 device incorporates all the functions required in the construction of a pulse-width-modulation (PWM) control circuit on a single chip. Designed primarily for power-supply control, this device offers the flexibility to tailor the power-supply control circuitry to a specific application.

The TL494 device contains two error amplifiers, an on-chip adjustable oscillator, a dead-time control (DTC) comparator, a pulse-steering control flip-flop, a 5-V, 5%-precision regulator, and output-control circuits.

The error amplifiers exhibit a common-mode voltage range from -0.3 V to  $V_{CC} - 2$  V. The dead-time control comparator has a fixed offset that provides approximately 5% dead time. The on-chip oscillator can be bypassed by terminating RT to the reference output and providing a sawtooth input to CT, or it can drive the common circuits in synchronous multiple-rail power supplies.

The uncommitted output transistors provide either common-emitter or emitter-follower output capability. The TL494 device provides for push-pull or single-ended output operation, which can be selected through the output-control function. The architecture of this device prohibits the possibility of either output being pulsed twice during push-pull operation.

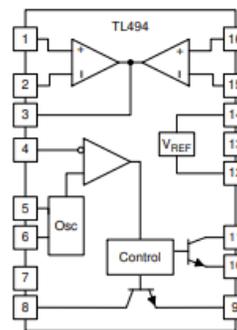
The TL494 device is characterized for operation from 0°C to 70°C. The TL494I device is characterized for operation from -40°C to 85°C.

Device Information<sup>(1)</sup>

PART NUMBER	PACKAGE (PIN)	BODY SIZE
TL494	SOIC (16)	9.90 mm × 3.91 mm
	PDIP (16)	19.30 mm × 6.35 mm
	SOP (16)	10.30 mm × 5.30 mm
	TSSOP (16)	5.00 mm × 4.40 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

4 Simplified Block Diagram



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

Figura E.5: Hoja de datos del circuito integrado TL494



# Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier

## AD620

### FEATURES

#### Easy to use

- Gain set with one external resistor (Gain range 1 to 10,000)
- Wide power supply range ( $\pm 2.3$  V to  $\pm 18$  V)
- Higher performance than 3 op amp IA designs
- Available in 8-lead DIP and SOIC packaging
- Low power, 1.3 mA max supply current

#### Excellent dc performance (B grade)

- 50  $\mu$ V max, input offset voltage
- 0.6  $\mu$ V/ $^{\circ}$ C max, input offset drift
- 1.0 nA max, input bias current
- 100 dB min common-mode rejection ratio (G = 10)

#### Low noise

- 9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 kHz, input voltage noise
- 0.28  $\mu$ V p-p noise (0.1 Hz to 10 Hz)

#### Excellent ac specifications

- 120 kHz bandwidth (G = 100)
- 15  $\mu$ s settling time to 0.01%

### APPLICATIONS

- Weigh scales
- ECG and medical instrumentation
- Transducer interface
- Data acquisition systems
- Industrial process controls
- Battery-powered and portable equipment

### CONNECTION DIAGRAM

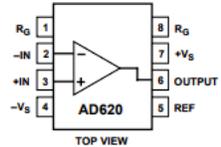


Figure 1. 8-Lead PDIP (N), CERDIP (Q), and SOIC (R) Packages

### PRODUCT DESCRIPTION

The AD620 is a low cost, high accuracy instrumentation amplifier that requires only one external resistor to set gains of 1 to 10,000. Furthermore, the AD620 features 8-lead SOIC and DIP packaging that is smaller than discrete designs and offers lower power (only 1.3 mA max supply current), making it a good fit for battery-powered, portable (or remote) applications.

The AD620, with its high accuracy of 40 ppm maximum nonlinearity, low offset voltage of 50  $\mu$ V max, and offset drift of 0.6  $\mu$ V/ $^{\circ}$ C max, is ideal for use in precision data acquisition systems, such as weigh scales and transducer interfaces. Furthermore, the low noise, low input bias current, and low power of the AD620 make it well suited for medical applications, such as ECG and noninvasive blood pressure monitors.

The low input bias current of 1.0 nA max is made possible with the use of Superbeta processing in the input stage. The AD620 works well as a preamplifier due to its low input voltage noise of 9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  at 1 kHz, 0.28  $\mu$ V p-p in the 0.1 Hz to 10 Hz band, and 0.1 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$  input current noise. Also, the AD620 is well suited for multiplexed applications with its settling time of 15  $\mu$ s to 0.01%, and its cost is low enough to enable designs with one in-amp per channel.

Table 1. Next Generation Upgrades for AD620

Part	Comment
AD8221	Better specs at lower price
AD8222	Dual channel or differential out
AD8226	Low power, wide input range
AD8220	JFET input
AD8228	Best gain accuracy
AD8295	+2 precision op amps or differential out
AD8429	Ultra low noise

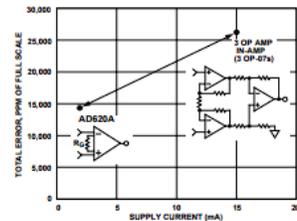


Figure 2. Three Op Amp IA Designs vs. AD620

#### Rev. H

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
 Tel: 781.329.4700 [www.analog.com](http://www.analog.com)  
 Fax: 781.326.8703 © 2003–2011 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Figura E.6: Hoja de datos del circuito integrado AD620