



**Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo**  
**Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería**  
ÁREA ACADÉMICA DE COMPUTACIÓN  
*Centro de Investigación en Tecnologías de Información y Sistemas*

---

---

***EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE INTERACCIÓN FÍSICA  
HOMBRE - ROBOT CON BASE EN EL PROTOCOLO NASA TLX***

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS COMPUTACIONALES

P R E S E N T A:

**Lic. en Comp. Rosario Barrera Gálvez**

DIRECTORES DE TESIS:

**D. en C. Omar Arturo Domínguez Ramírez**  
**D. en C. Ervin Jesús Álvarez Sánchez**

Pachuca de Soto, Hidalgo, a 23 de septiembre de 2014



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO  
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA  
Área Académica de Computación y Electrónica  
Maestría en Ciencias Computacionales

Oficio No. MCC/25/2014

Lic. Rosario Barrera Gálvez  
PRESENTE

Por este conducto le comunico que el jurado asignado para la revisión de su trabajo de tesis titulado "Evaluación de un Sistema de Interacción Física Hombre-Robot con base en el Protocolo NASA TLX", que para obtener el grado de Maestro en Ciencias Computacionales fue presentado por usted, ha tenido a bien, en reunión de sinodales, autorizarlo para su impresión después de verificar las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se integran las firmas de conformidad de los integrantes del jurado:

PRESIDENTE:	DR. OCTAVIO CASTILLO ACOSTA
VOCAL:	DR. OMAR ARTURO DOMÍNGUEZ RAMÍREZ
SECRETARIO:	DR. ERVIN JESÚS ALVAREZ SÁNCHEZ
SUPLENTE:	M. EN C. ARTURO CUIEL ANAYA
	M. EN C. MARIANO J. POZAS CÁRDENAS

ATENTAMENTE  
"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"  
Mineral de la Reforma, Hgo., a 15 de septiembre de 2014.



M.C.C. Iliana Castillo Pérez  
Coordinadora de la Maestría en Ciencias Computacionales

c.c.p. Archivo



Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería,  
Carretera Pachuca - Tulancingo Km 4.5, Ciudad del Conocimiento,  
Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184  
Tel. +52 771 7172000 ext. 6734  
ilianaci@uaeh.edu.mx



## Resumen

Hasta hace unos años, el estudio sistemático de las interacciones había sido campo privilegiado de la sociología; en la actualidad, el trabajo conjunto entre la robótica, la medicina y la computación, ha revolucionado la forma en que se estudia la operación remota de sistemas robóticos complejos que beneficien la rehabilitación humana a través de la repetición de movimientos precisos. Esta investigación es derivada del trabajo realizado con la participación de humanos sanos, jóvenes estudiantes universitarios, tomando como muestra a las carreras de Medicina, Odontología y Enfermería del Instituto de Ciencias de la Salud, debido al contacto con este tipo de interacción tripartita: humanos (medicina), software (computación) y tecnología (robótica).

Como parte de la metodología se utilizó un diseño transversal descriptivo y prospectivo, dentro de un estudio observacional, con la finalidad de evaluar un Sistema de Interacción Física Hombre-Robot con base en el protocolo NASA TLX, a partir de las variables: esfuerzo, frustración, carga mental, carga temporal y estrés, y su relación con la usabilidad y la utilidad en sistemas de interacción física entre un humano y un sistema robótico (HRpl) con propósitos de entrenamiento remoto y rehabilitación de miembro superior. Del ambiente los parámetros fueron: temperatura, humedad relativa y nivel de iluminación en el área de trabajo de manera controlada; y el nivel de ruido como efecto indirecto en el desempeño del operador. El procedimiento incluyó el diseño de una tarea de navegación en un ambiente virtual dinámico tridimensional, en modos de exploración libre y guiado háptico pasivo y activo.



## Abstract

A few years ago the systematic research about interactions has been a privileged theme from Sociology; actually, Medicine, Robotics and Computing works together like sciences to develop a better way to study the remote operation into complex robotic systems that bring as benefit the human rehabilitation making a repetition of continuous movements. This research was based in work done with health and young university scholar human's participation, taking as sample the Medicine, Dentistry and Nursing areas from the Institute of Health Sciences, and their important contact with this third interaction: humans (Medicine), software (Computing) and Technology (Robotics).

As part of methodology, it was used a descriptive cross-sectional and prospective design, inside an observational study, in order to evaluate a Physical Human-Robot Interaction System based on the NASA TLX protocol, abroad of next variables: effort variables, described frustration, mental load, load time and stress, and its relation to the usability and utility systems physical interaction between a human and a robotic system (HRpl) for purposes of remote training and rehabilitation. The procedure included the design of a three-dimensional dynamic virtual environment free scanning modes and passive and active haptic guidance.



## Agradecimientos

*A Dios, que me ha bendecido en toda mi vida;*  
*A la vida, por permitirme vivirla de manera única y cerrar ciclos;*  
*A mi hijo Alexander, por toda tu paciencia y amor;*  
*A mi familia, por su comprensión y el amor que me han brindado;*  
*A mis amigos, Caya, Claus y en especial a Luis Enrique Díaz Pérez, por ser mi Ángel; a usted*  
*mi respeto y admiración;*  
*A mis compañeros en esta investigación, José Manuel y Miguel Oswaldo por su valioso apoyo;*  
*A mi Director de Tesis, Omar Arturo Domínguez Ramírez; por tu brillante idea y creer en mí*  
*para llevar a cabo esta investigación;*  
*Al Instituto de Ciencias de la Salud y mis compañeros de trabajo por su apoyo en este proceso*  
*de investigación.*

## Dedicatoria

*Les dedico este trabajo donde invertí tiempo, esfuerzo y sensibilidad a:*

*Mi Madre,*  
*Mi hijo Alexander,*  
*Mis hermanos,*  
*Mis Sobrinos-Hijos,*  
*y al Amor.*

*“El deber de un hombre es estar allí, donde es más útil”*

*José Martí*



## Índice

Resumen .....	3
Abstract .....	4
Agradecimientos .....	5
Índice .....	6
Índice de figuras .....	8
Índice de tablas.....	10
Índice de ecuaciones .....	10
Lista de acrónimos y abreviaturas.....	11
Introducción .....	12
Capítulo 1 Descripción de la tesis .....	14
1.1 Antecedentes. ....	15
1.2 Retroalimentación háptica .....	19
1.3 Breve descripción del estado del arte .....	22
1.4 Justificación.....	31
1.4.1 Objetivo general.....	32
1.4.2 Objetivos específicos.....	32
1.5 Hipótesis .....	33
1.6 Descripción del problema .....	33
1.7 Descripción de la posible solución.....	34
1.8 Contribución de la tesis .....	36
Capítulo 2 Sistema de Interacción Física Hombre-Robot con dispositivos hápticos .....	37
2.1 Dispositivos hápticos .....	38
2.2 Dispositivo hápticos PHANToM.....	39
2.2.1 Tipos de interfaz PHANToM.....	40
2.2.2 Especificaciones técnicas .....	41
2.2.3 Base computacional.....	42
2.3 Descripción del protocolo NASA TLX. ....	43
2.3.1 Métodos subjetivos .....	48
2.3.2 Información proporcionada por calificaciones subjetivas .....	49
2.3.3 Fuentes de clasificación de variabilidad .....	51
2.3.4 El protocolo NASA TLX.....	52
2.3.5 Cómo identificar una escala de calificación en un Sistema de Interacción Física Hombre-Robot .....	55
Capítulo 3 Metodología del Estudio .....	59
3.1 Tipo y diseño de investigación.....	60
3.2 Universo y muestra.....	61
3.3 Definición de variables .....	64
3.4 Criterios de selección .....	64
3.5 Instrumento de recolección de datos .....	65
3.6 Plan de recolección de los datos .....	66
3.7 Recursos para llevar a cabo la investigación.....	66
3.8 Metodología de la investigación.....	69
3.9 Ética del estudio .....	72



---

Capítulo 4 Plataforma HRpl para evaluación de habilidades motoras en miembro superior .....	75
4.1 Diseño de la plataforma HRpl.....	78
4.2 Evaluación experimental.....	92
Capítulo 5 Resultados experimentales de evaluación y entrenamiento.....	94
5.1 Estadística descriptiva de las variables. ....	95
5.1.1 Variables generales de la aplicación del cuestionario NASA TLX .....	95
5.1.2 Dispositivo háptico Phantom Omni.....	112
5.2 Resultados de la aplicación del protocolo NASA TLX .....	116
Capítulo 6 Discusión y Conclusiones .....	120
6.1 Discusión.....	121
6.2 Conclusiones.....	123
Referencias .....	125
Glosario de términos.....	129
Apéndice A: "Hoja técnica de los elementos de un dispositivo háptico" .....	132
Apéndice B: "Tabla de definición de variables". ....	133
Apéndice C: "Cuestionario basado en el protocolo NASA TLX" .....	136
Apéndice D: "Consentimiento Informado" .....	138
Apéndice E: "Oficio de Comité de Ética e Investigación" .....	139
Apéndice F: "Espacio de trabajo de la circunferencia". ....	140



## Índice de figuras

Figuras/ Gráficas	Título	Página
1.1	Diagrama esquemático del sistema de guiado.	24
1.2	Plataforma experimental (solución robótica de laberintos).	26
1.3	Marco conceptual de las variables relacionadas que influyen en el rendimiento humano y carga de trabajo.	29
2.1	Dispositivo háptico PHANToM Premium 1.0	39
2.2	Dispositivo háptico PHANToM Omni, izquierda: fotografía del dispositivo, derecha: representación de su cadena cinemática	40
2.3	Mapa conceptual del protocolo NASA TLX	45
2.4	Cuestionario NASA TLX	55
2.5	Pantalla de captura de datos en NASA TLX.EXE	56
2.6	Segunda parte de la aplicación computacional NASA TLX.EXE	56
3.1	UAEH-Instituto de Ciencias de la Salud	61
3.2	Cálculo de una muestra, para población finita conocida.	62
3.3	Espacio físico donde se tomaron los signos vitales	67
3.4	Metodología para la evaluación de un Sistema de Interacción Física Hombre - Robot.	69
3.5	Phantom Omni y la conexión de la plataforma computacional.	70
4.1	Configuración del guiado háptico	77
4.2	Diseño de la plataforma Sistema de Interacción Física Hombre-Robot(HRpl)	79
4.3	Representación de un toroide seccionado.	80
4.4	Espacio de trabajo del hipertubo	81
4.5	Desempeño en el espacio de trabajo	85
4.6	Estructura del panel de control para medir el medio ambiente	87
4.7	Bloque esquemático para la captación de las variables del medio ambiente.	87
4.8	Estructura de los archivos ambientales en extensión txt	88
4.9	Espacio de trabajo en el CLEMPS donde se llevó a cabo la investigación	89
4.10	Cronograma de actividades de la investigación	91
4.11	Espacio físico donde se llevó a cabo la investigación	92
5.1	Encuestados por género, ICSa-2014.	94
5.2	Edad de los participantes, ICSa-2014.	95
5.3	Participación por Programa Educativo, ICSa-2014	96
5.4	Estado civil de los participantes, ICSa-2014	96



Figuras/ Gráficas	Título	Página
5.5	Usuario con experiencia en juegos de realidad virtual, ICSa-2014.	97
5.6	Temperatura corporal inicial y final del total de los participantes, ICSa-2014.	98
5.7	Número de eventos con variación en la temperatura corporal Inicial menos la final del total de participantes, ICSa-2014.	99
5.8	Frecuencia cardiaca inicial y final; ICSa-2014	101
5.9	Número de eventos con variación en la frecuencia cardiaca inicial menos la final del total de los participantes, ICSa-2014.	102
5.10	Número de eventos con variación en la frecuencia cardiaca Inicial menos la final por Programa Educativo, ICSa-2014	103
5.11	Número de eventos con variación en la presión arterial sistólica inicial menos la final por Programa Educativo, ICSa-2014.	105
5.12	Número de eventos con variación en la presión arterial diastólica inicial menos la final por Programa Educativo, ICSa-2014.	106
5.13	Temperatura ambiental y humedad ICSa-2014	109
5.14	Ruido al inicio de la investigación ICSa-2014	110
5.15	Ruido durante el proceso ICSa-2014	111
5.16	Tiempo de ejecución con los dispositivos hápticos	112
5.17	Espacio de trabajo de los dispositivos hápticos	113
5.18	Rendimiento de movimientos de los participantes.	113
5.19	Desempeño de los participantes	114
5.20	Resultados de la aplicación del protocolo NASA TLX	116
5.21	Carga de trabajo identificada con el protocolo NASA TLX	117

## Índice de tablas

Tablas	Título	Página
2.1	Características de las interfaces hápticas PHANToM.	41
2.2	Consideraciones técnicas empleadas para la interfaz Phantom Omni.	43
2.3	Descripción de las sub-escalas del protocolo NASA-TLX	47
2.4	Ponderación de las sub-escalas con el protocolo NASA TLX	52
2.5	Cálculos internos del NASA TLX.	58
2.6	Resultados de la aplicación del programa en Excel del NASA TLX	58
3.1	Indicadores del protocolo NASA TLX	66
4.1	Datos.txt para la tarea del hipertubo	82
4.2	Datos.txt para tarea de guiado háptico en activo	86
4.3	Datos.txt para tarea de guiado háptico en pasivo	87
5.1	Valores estadísticos de la frecuencia cardiaca inicial y final; ICSA, 2014	100
5.2	Clasificación de la presión arterial	104
5.3	Humedad (mm <sup>3</sup> ) temperatura ambiente (°C) ICSa-2014	108
5.4	Resultados de la aplicación del protocolo NASA TLX	115

## Índice de ecuaciones

Ecuaciones	Título	Página
4.1	Expresión matemática de un toroide	80
4.2	Valor de ángulos $\alpha$ y $\beta$	81
4.3	Modelo cinemático de posición	83
4.4	Modelo cinemático inverso	83
4.5	Modelo cinemático de velocidad	84
4.6	Modelo cinemático de aceleración	84
4.7	Paramétrica de la circunferencia	85

## Lista de acrónimos y abreviaturas

Acrónimos y abreviaturas	Definición
3D	Tercera dimensión
CITIS	Centro de Investigación en Tecnologías de Información y Sistemas
CLEMPS	Centro Latinoamericano de Estudios Médicos por Simulación
CRIT	Centros de Rehabilitación Infantil Teletón
GB	Giga byte
GDL	Grados de libertad
GHz	Giga Hertz
HRpl	Sistema de Interacción Física Hombre-Robot
ICBI	Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
ICSA	Instituto de Ciencias de la Salud
JPL	Jet Propulsion Laboratories
MatLab	MATrix LABoratory
MIT	Instituto de Tecnología de Massachussets
NASA TLX	National Aeronautics and Space Administration Task Load Index.
NOM	Norma Oficial Mexicana
PE	Programa Académico
RAM	Memoria de Acceso Aleatorio
RUR	Robots Universales Rossum
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
SSA	Secretaría de Salud Federal
UAEH	Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo



## Introducción

La robótica ha revolucionado el mundo de la medicina siendo una herramienta coadyuvante en análisis y en la terapia física. Los robots tienen sistemas que evocan movimientos a través de protocolos prediseñados los cuales identifican y evalúan movimientos dinámicos así como trastornos de coordinación.

Para los sistemas de interacción física hombre robot, los esquemas clásicos de evaluación corresponden a la medición de las variables física que describen el desempeño del sistema robótico, particularmente la convergencia y la energía de intercambio.

Sin embargo, diversos resultados obtenidos de manera aislada permiten observar que el desempeño no sólo depende de la tarea definida en el robot como una consigna de movimiento, también de la percepción del usuario en el uso de esa interfaz. Los criterios empleados en interfaces hombre máquina corresponden a indicadores de usabilidad y utilidad, no así cuando hay una interacción física.

El presente documento describe una investigación que pretende identificar la relación estrecha entre las variables físicas de desempeño robótico con las sensaciones existentes en el ser humano en el momento de realizar una tarea.

La investigación incorporó una serie de variables físicas-ambientales que pueden tener efectos en los indicadores resultantes (iluminación, humedad relativa, temperatura y ruido), así como signos vitales.

Por recomendación en esquemas de evaluación de plataformas con estas características se propone desarrollar una evaluación extensiva en una muestra de personas que se asumen sanas y verificar el desempeño global con análisis estadístico descriptivo y con perspectivas de predicción y diagnóstico como posibles trabajos futuros.

Es precisamente el tema de investigación y desarrollo de esta tesis: la “Evaluación de un Sistema de Interacción Física Hombre-Robot con base al Protocolo NASA TLX”; dividiendo el trabajo de investigación en 5 capítulos.



Capítulo 1, Descripción de la Tesis; establece los antecedentes y conceptualiza los sistemas de interacción física; así como la definición de los dispositivos hápticos (brazo robótico) y los estudios que anteceden a esta investigación; donde se realiza la evaluación del comportamiento del ser humano con el uso del dispositivo háptico, utilizando una carga de trabajo con la interacción basada en el protocolo NASA TLX. En donde se encuentra la relación estrecha entre las variables físicas del desempeño robótico, con las sensaciones existentes con el ser humano en el momento de realizar la tarea.

Capítulo 2, Sistema de Interacción Física Hombre-Robot (HRpl) con dispositivos hápticos; se describe una panorámica con respecto a los conceptos de las variables principales que permiten identificar y determinar el grado óptimo de desarrollo de la carga de trabajo del usuario con los dispositivos hápticos a través del Protocolo NASA TLX.

Capítulo 3, Metodología del estudio; describe los materiales y métodos que enmarcan los aspectos del diseño de la investigación, el muestreo, la descripción de los escenarios, variables de estudio y el método a seguir para realizar la evaluación de un sistema de interacción físico hombre-robot, así como de los usuarios.

Capítulo 4, Plataforma HRpl para evaluación de habilidades motoras en miembro superior; en este apartado se toma como referencia el modelo para evaluar de un sistema de interacción físico hombre-robot, en su fase 1: diseño y desarrollo de la Interfaz.

Capítulo 5, Resultados experimentales de evaluación y entrenamiento; se describen los resultados obtenidos en la realización de la investigación, captura de los datos y emisión de resultados que permite evaluar un Sistema de Interacción Física Hombre-Robot, así como los datos obtenidos a través de la plataforma computacional y que fueron generados en cada experimento al realizar la tarea de navegación, o exploración háptica.

Capítulo 6, Discusión y conclusiones; se describe la discusión con la información obtenida y se emiten las conclusiones con la identificación de las mejores condiciones de operación de la interfaz, de acuerdo a la carga de trabajo que realizó el usuario.



# Capítulo 1

Descripción de la tesis



## 1.1 Antecedentes.

Los sistemas de información han permitido dar un orden en el desarrollo de las organizaciones, en otras épocas las tareas se desarrollaban de manera manual y repetitiva; lo cual hacía que se perdiera tiempo y esfuerzo por parte del ser humano. Con la llegada de los sistemas de información estas tareas se automatizaron y la cantidad de esfuerzo que ahora tiene que hacer el hombre, es menor comparada con el de otros tiempos.

La toma de decisiones dentro de una organización debe soportarse en información oportuna y veraz, características que coinciden con el desarrollo de los sistemas de información, lo que justifica su existencia y la agilidad de captar, almacenar, procesar y rescatar los datos, todo ello para contar con una planeación y control organizacional [1].

Desde el punto de vista técnico se define un sistema como “un grupo de componentes interrelacionados, que trabajan en conjunto hacia una meta en común mediante la aceptación de unas entradas y generando unas salidas en un proceso de transformación organizada” [2]. Además de identificar entradas, proceso y salidas, los sistemas tienen dos componentes más: la retroalimentación, que son los datos que indican el desempeño de un sistema, y el control, que comprende el monitoreo; para determinar que un sistema esté llevando bien su objetivo.

Una vez que identificamos qué es un sistema podemos citar la siguiente definición de sistema de información “conjunto organizado de personas, hardware, software, redes de telecomunicaciones y recursos de datos, los cuales al ser combinados, permiten la transformación y diseminación de los datos o información de una organización” [2] y la definición más conocida según Sergio Muñoz Cruz [3] es “un conjunto de elementos o componentes relacionados con la información que interactúan entre sí para lograr un objetivo: facilitar y/o recuperar información”. No siempre un sistema de información debe estar automatizado (en este caso se trataría de un sistema informático), y es válido hablar de Sistemas de Información.

En el desarrollo de esta investigación se utilizaron sistemas de interacción, los cuales se definen como “interacciones a los cuerpos que entre sí, ejercen



acciones mutuas o influencias”<sup>1</sup>. Un sistema de interacción física es la relación de las causas que provocan los cambios de estado físico y/o estado de movimiento<sup>2</sup>. Se realizaron los experimentos planeados que permiten describir a los factores capaces de producir alteraciones de un sistema físico, cuantificarlos y plantear ecuaciones de movimiento o ecuaciones de evolución para dicho sistema.

Un estado físico es cada una de las situaciones o formas físicamente distinguibles mediante la medición de algunas propiedades que puede adoptar un sistema físico en su evolución temporal. Es decir, en un sistema físico que está sufriendo cambios, un estado físico es cualquiera de las situaciones posibles como resultado de dichos cambios.

En la literatura se encontró que sólo se han evaluado con el protocolo NASA TLX un número de casos pequeños tal es el caso de los estudios realizados en Estados Unidos de Norteamérica con 36 casos y con un sistema de interacción física Hombre-Robot en México hasta 8 casos en el CRIT y Teletón proyecto dirigido por Dr. Omar A. Domínguez-Ramírez denominado plataforma de neurorehabilitación de miembro superior por guiado háptico para pacientes pediátricos con discapacidad motriz, realizado en el estado de Hidalgo y Coahuila.

En el presente estudio se evalúa un sistema de interacción física hombre-robot, con el objetivo de identificar la calidad de la plataforma computacional con un hipertubo en 3 Dimensión y una circunferencia con guía activo y pasivo, así como el rendimiento del dispositivo háptico Phantom Omni de tal manera que se cuenten con datos que nos permitan minimizar los márgenes de error de los dispositivos que se pondrían a disposición de los usuarios.

La robótica es la rama de la tecnología que se dedica al diseño, construcción, operación, disposición estructural, manufactura y aplicación de los robots<sup>3</sup>. La robótica combina diversas disciplinas como son: la mecánica, la electrónica, la informática, la inteligencia artificial, la ingeniería de control y la física; así como el álgebra, los autómatas programables, la animatrónica y las máquinas de estados.

---

<sup>1</sup> <http://www.rena.edu.ve/cuartaEtapa/fisica/Tema6a.html>

<sup>2</sup> Movimiento es un cambio de la posición de un cuerpo a lo largo del tiempo respecto de un sistema de referencia. El estudio del movimiento se puede realizar a través de la cinemática o a través de la dinámica. En función de la elección del sistema de referencia quedaran definidas las ecuaciones del movimiento, ecuaciones que determinarán la posición, la velocidad y la aceleración del cuerpo en cada instante de tiempo.

<sup>3</sup> Robot, es la palabra Checa más difundida en todo el mundo.





La palabra robot se popularizó con el éxito de la obra<sup>4</sup> RUR (Robots Universales Rossum), escrita por Karel Capek en 1920. En la traducción al inglés de dicha obra, la palabra checa robota, que significa trabajos forzados, fue traducida al inglés como robot<sup>5</sup>, al que se le da el término de "automática" en relación con la teoría de la automatización de tareas tradicionalmente asociadas.

Con el paso del tiempo, la robótica se estableció como manipuladores industriales con un impacto relevante en diferentes procesos industriales como: posicionamiento de objetos en el espacio, desarrollo de tareas de cortes y barrenado, pintura, montajes, entre otros; sin embargo, la ejecución de la tarea una vez planificada implicaba fallos en la operación por no considerar la dinámica del robot y su entorno. La industria consideró realizar diseños de planificación con controles de simuladores digitales que permitían realizar la tarea con un margen de error mucho menor, es decir, controlar al robot de tal manera que su actividad fuera exacta.

En el caso de los robots, que son diseñados para el apoyo de una actividad humana, esto cambia debido a que el robot se debe adaptar a las necesidades de movimiento del ser humano. Estudios e investigaciones realizadas a fines del siglo XX han demostrado que el diseño de robots tenía como finalidad cubrir la pérdida de algún miembro superior o inferior, en el caso de seres humanos; así como en el área de terapia de rehabilitación física basada en tareas orientadas a los movimientos repetitivos ayuda a mejorar el trastorno de movimiento de los pacientes. Y esta acción se vuelve efectiva cuando el fisioterapeuta la realiza de manera precisa y eficaz, este proceso exige consistencia y homogeneidad en la tarea física.

El uso original del término **Biofeedback** (bio-retroalimentación), se refiere a una técnica que se emplea para controlar las funciones fisiológicas del organismo humano, mediante la utilización de un sistema de retroalimentación que informa al sujeto del estado de la función que se desea controlar de manera voluntaria<sup>6</sup>.

---

<sup>4</sup> La palabra Robot se empleó por primera vez en 1920 en una obra de teatro llamada "R.U.R" o "Los Robots Universales de Rossum" escrita por el dramaturgo checo Karel Capek. La trama era sencilla: el hombre fabrica un robot, luego el robot mata al hombre. Muchas películas han surgido mostrando robots como máquinas dañinas y amenazadoras. La palabra checa "Robota" significa servidumbre y cuando se tradujo al inglés se convirtió en el término robot.

<sup>5</sup> Dicha palabra había sido ideada por el hermano del autor, Josef Čapek (1887 - 1945).

<sup>6</sup> <http://audiologiaondas.com/biofeedback/>



El término biofeedback está compuesto por la palabra griega *bio*, que significa vida, y la inglesa *feedback* que significa retroalimentación o retroinformación, por lo tanto biofeedback podría traducirse por *bio-retroalimentación*, por ello la importancia de describir la investigación de Daniel David Palmer [4] final del siglo XX.

El concepto de ***tarea orientada a la formación repetitiva*** sugiere que la terapia de bio-retroalimentación debe ser durante el movimiento dinámico relacionado para optimizar la mejoría de la función motora; la tecnología avanzada actualmente facilita el diseño de sistemas de retroalimentación biológica que poseen diversos parámetros, visualización de señal avanzada y sofisticados sistemas de control para el uso en biofeedback orientado a las tareas [5] de rehabilitación neuromotora.

De esta manera, ofrece opciones para los pacientes con problemas motores, ya que al usar una máquina con desarrollo de tareas de forma repetida, puede mejorar la salud y calidad de vida del usuario-paciente.

Con el apoyo de sistemas de neurorehabilitación biónica y robótica, las personas que padecen de una discapacidad física, pueden volver a aprender movimientos como el caminar o tomar algún objeto y a través del uso de estos métodos terapéuticos que se basan en la repetición de la acción y la formación orientada a tareas, les permite facilitar su rehabilitación motora.

Es decir, las personas que viven con discapacidad física tienen la oportunidad de utilizar métodos terapéuticos basados en la repetición de acciones con el apoyo de sistemas de neurorehabilitación biónica y robótica, y así reaprender movimientos como el caminar o tomar algún objeto, y desarrollar tareas que le faciliten su rehabilitación motora.

Sin embargo, el uso de estos sistemas durante los procesos de rehabilitación neurológica no sustituye el trabajo de los especialistas ni de la terapia convencional, sino que se incorpora con otros programas para permitir al paciente realizar sesiones donde se repiten ciclos de trabajo simulando tareas específicas con el objeto de incrementar su duración, su intensidad y la precisión de los movimientos en cada uno de los segmentos corporales.



Es decir, se potencializa el efecto de la terapia física a través de mejoría en la calidad de movimiento, a mayor número de repeticiones por terapia, se da una exactitud en las mismas, disminuyendo el tiempo de recuperación. Por otro lado la rehabilitación neurológica por medio de robots simula actividades con movimientos funcionales para la vida diaria con retroalimentación virtual y que reciba estimulación dependiendo del esfuerzo que se está llevando a cabo así, la robótica ha revolucionado el mundo de la medicina siendo una herramienta coadyuvante en análisis y terapia. Los robots tienen sistemas que evocan movimientos a través de protocolos prediseñados los cuales identifican y evalúan movimientos dinámicos así como trastornos de coordinación.

Su finalidad es el mejorar la habilidad y eficacia de los tratamientos enseñando al sistema nervioso a controlar el movimiento, a reprogramar al sistema nervioso y a recuperar o maximizar la capacidad neuronal a través de la manipulación y locomoción, y se pretende contar con información que nos pueda decir que tanto se estresan o relajan los usuarios al contar con un robot de apoyo para realizar una tarea específica y repetitiva.

## 1.2 Retroalimentación háptica

Los dispositivos especializados para proveer de retroalimentación háptica, son el resultado de décadas de investigación activa en la industria y en laboratorios de universidades. En las décadas de los 50's y 60's, cuando la realidad virtual no existía, la investigación se orientó al desarrollo y mejoramiento de sistemas telerobóticos. En dicho sistema, el operador humano controla un brazo maestro que transmite sus comandos de movimiento a un esclavo remoto. El esclavo sigue a la entrada del maestro, interactuando con ambientes peligrosos tales como: nuclear, espacio exterior o sitios submarinos.

El primer sistema de teleoperación estaba constituido únicamente de transmisiones mecánicas para que el esclavo estuviera muy aproximado a los movimientos del maestro. Un primer servomecanismo eléctrico fue desarrollado en 1954 por Goertz y Thompson en el Laboratorio Nacional de Argonne [6]. Los servoactuadores reciben señales de retroalimentación a los sensores del esclavo, y aplican fuerzas a la mano del operador humano, quien sujeta al maestro. En este sentido, el operador humano siente como si él estuviera manipulando directamente al sistema remoto.



Para el año de 1965, el pionero de la computación gráfica, Ivan Sutherland propone una interfaz de despliegue visual para mundos virtuales que incluye retroalimentación háptica [7]. En 1967, Frederick Brooks Jr., y colaboradores de la Universidad de Carolina del Norte, motivados por la visión de Ivan Sutherland sobre gráficas computacionales interactivas con retroalimentación de fuerza, desarrollaron el proyecto GROPE, cuyo ambicioso objetivo fue, desarrollar en tiempo real, cortes con retroalimentación de fuerza de moléculas tridimensionales. Proyecto que permitió desarrollar investigación de retroalimentación de fuerza, durante un largo período.

En 1976 este equipo de investigación utilizó accesorios y dispositivos sobrantes del proyecto de Goertz para simular fuerzas de colisión en tres dimensiones [8]. El equipo de investigación de Brooks perseveró en lograr su objetivo original y 20 años más tarde, con equipo computacional de alto desempeño, logró culminar su trabajo.

A finales de los 80's, investigadores de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y de JPL (Jet Propulsion Laboratories) desarrollaron un brazo maestro de seis grados de libertad con retroalimentación de fuerza con propósitos de tele operación, y cuyas aplicaciones correspondan a las misiones de reparación espacial. Para efectos de prueba experimental, utilizaron el Salisbury/JPL Arm. El esquema en ese momento requería que los modelos cinemáticos de los dispositivos maestro y esclavo fueran similares, situación que propiciaba la construcción de dispositivos maestros de excedidas dimensiones.

Posteriormente, se desarrollaron aplicaciones con excelente desempeño en el que los dispositivos esclavos fueron diseñados por ambientes virtuales flexibles con propósitos de entrenamiento [9].

Todos los dispositivos maestros presentados anteriormente, originalmente fueron desarrollados para aplicaciones en telerobótica, y no como dispositivos de entrada y salida para realidad virtual, siendo un campo que aparece posterior a los años 70's.

Los investigadores de la telerobótica iniciaron la construcción de dispositivos especiales, con retroalimentación táctil y de fuerza. Uno de los primeros prototipos que proporcionó retroalimentación táctil, a partir de una simulación gráfica, fue el



sistema SANDPAPER desarrollado en el “MIT Media Lab” (Escuela de Arquitectura y Planificación en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Fundado en 1985)

Este prototipo consiste en un joystick de dos grados de libertad con actuadores eléctricos, y un ancho de banda de la retroalimentación táctil y de fuerza, definido entre 500 Hz y 1000 Hz. Con estas especificaciones fue posible mover el cursor sobre diferentes muestras del SANDPAPER virtual y sentir la textura de su superficie, en algunos de los casos se modeló inercia y amortiguamiento en una simulación bidimensional. Los sistemas desk-top, tales como los joysticks con retroalimentación, tienen la ventaja de utilizar actuadores voluminosos de considerable ancho de banda y cuyo peso es soportado por el escritorio en donde son colocados. El inconveniente es la reducción significativa del espacio de movimiento libre para el usuario, ya que la mano tiene que permanecer sobre el joystick.

El Rutgers Master es un dispositivo que permite más libertad de movimiento en la mano del usuario, fue desarrollado en el Centro CAIP de la Universidad de Rutgers en 1992. Este dispositivo utiliza cuatro microactuadores neumáticos ubicados en la palma de la mano para dar al usuario la sensación de dureza al manipular al objeto virtual. El peso es de 100 gramos, por consiguiente no cansa al usuario durante simulaciones prolongadas.

De 1993 a 1995 surgieron, de manera comercial, dispositivos con retroalimentación háptica, visual y auditiva. La tendencia del costo fue disminuyendo y con ello logrando que la comunidad de interfaces hápticas diversificara las aplicaciones, propusiera algoritmos nuevos y más rápidos, logrará la integración con otros dispositivos especializados, etc. Los dispositivos que lograron este propósito son el Touch Master y el SAFIRE Master en 1995, el PHANToM Arm en 1994 utilizado experimentalmente en este trabajo de investigación, y el Impulse Engine en 1995 [10].

Paralelamente surge, en Japón y en países europeos, una gran diversidad de dispositivos hápticos portables y no portables o de escritorio. Los dispositivos hápticos desk-top o no portables han tenido un impacto relevante por su bajo costo, por el tipo de aplicaciones y por las especificaciones técnicas que presentan, tal es el caso del PHANToM Arm, que es considerado para la comprobación experimental de los algoritmos y estrategias de control.



Otros dispositivos de alto desempeño fueron desarrollados paralelamente en Japón, como el SPIDAR I y II del Instituto de Tecnología de Tokyo, el Sensing Glove de Hashimoto desarrollado en la Universidad de Tokyo en 1994, el Joystick de seis grados de libertad Haptic Master de Nissho Electronics Co en 1995, la interfaz háptica Pen-Based de la universidad de Tsukuba en 1993, la interfaz háptica SPICE de Suzuki Motor Co. en 1994 y 1995 y manipuladores cartesianos como el joystick cartesiano SICE del Instituto Nacional de Biociencia y Tecnología Humana en 1994.

### 1.3 Breve descripción del estado del arte

Este estudio “Evaluación de un Sistema de Interacción Física Hombre-Robot”, nace a partir de proyectos realizados previamente:

1. La neurorehabilitación robótica basada en guiado kinestésico local para miembro superior con movimiento involuntario. [11]
2. Evaluación de una interfaz con base en el protocolo NASA TLX. [12]

Empecemos por identificar que la neurorehabilitación robótica basada en guiado kinestésico local para miembro superior con movimiento involuntario, el cual se centra en las personas que presentan alguna discapacidad motriz. Estas personas demandan los beneficios de acciones especializadas en el campo de la prevención, promoción, asistencia, rehabilitación y habilitación para el desarrollo de sus potencialidades, tales como el volver a escribir, desplazar objetos con desempeño biomecánico natural, así como las tareas que involucran la coordinación de ambas extremidades. Todo lo anterior, con la finalidad de reintegrarse a las actividades cotidianas y sociales que le permitan contar con una mejor calidad de vida.

Cabe destacar que el uso de dispositivos hápticos, con fines de terapia física, se ha implementado en los últimos años en el área de neurorehabilitación, esto con la finalidad de reducir el tiempo de recuperación en el paciente. La discapacidad de movimiento por una lesión neurológica (accidente vascular encefálico; enfermedad de parkison; fisiología de la contracción muscular; hemiplejía; distrofia muscular); puede caracterizarse por movimiento involuntario (son trastornos neuromotores que interfieren en la vida diaria del individuo y ocurren sin control consciente de las personas, es decir el cerebro no obedece ni interviene dando órdenes) es decir,



son señales biomecánicas con cambios de frecuencia y amplitud representativas de cambios abruptos de la extremidad y por movimiento limitado de tipo hemipléjico es un trastorno del cuerpo para controlar sus movimientos y se identifican como señales biomecánicas de baja frecuencia y amplitud representativas de condiciones espásticas [13].

El auge de la rehabilitación en Latinoamérica comenzó después de las 2 guerras mundiales, especialmente de la segunda y motivada también por las epidemias de poliomielitis de las décadas de los 40 y 50. Era lógico entonces que los primeros médicos preocupados por la rehabilitación fueran ortopedistas, esto debido a la necesidad de tratar las secuelas musculoesqueléticas que casi siempre terminaban en deformaciones de resolución quirúrgica. Ellos fueron los iniciadores de la rehabilitación en casi todos los países.

En esa época no existían instituciones monovalentes y durante mucho tiempo, la rehabilitación se efectuó en un sector de los hospitales de pacientes con discapacidad aguda. The American Electrotherapy Association (Estados Unidos de América) fundada en 1890, fue la primera organización americana con profesionales que se dedicaban al uso de los medios físicos con base científica. En 1934, en Argentina, nace un grupo de médicos, la “Asociación Médica de Kinesiología”, con orientación total a los agentes físicos<sup>7</sup>.

Los tratamientos físicos se eternizaban, desconociéndose la posibilidad de compensación de la secuela por otros métodos. Es decir, se pensaba más que la medicina física podía resolver los problemas y se daba menos importancia a la rehabilitación.

La realización de investigaciones de neurorehabilitación en un paciente con discapacidad de movimiento, que le impide la habilidad de realizar movimientos controlados o voluntarios, empleando un procedimiento de rehabilitación convencional, es decir ejercicios rutinarios que generarán beneficios al paciente; sin embargo podemos identificar algunas desventajas tales como:

1. Diagnóstico médico, con tratamiento de ejercicios de fisioterapia.
2. Actividad de fisioterapia convencional.

---

<sup>7</sup> <http://www.samfvr.org/historia.html>.

3. Caracterización y análisis de movimiento que permita definir la tarea de fisioterapia correcta.

El propósito de la neurorehabilitación es contribuir a que un paciente recupere la funcionalidad e independencia para mejorar su calidad de vida tanto en el desempeño físico como la adaptación social. Esta investigación se basó en la práctica y la repetición controlada y supervisada en el paciente, realizando un programa basado en un modelo de aprendizaje motor normal, que inicie en eliminar la actividad neuromuscular anormal con bio-retroalimentación, reducción a partir de la neuro-plasticidad e interrelación entre postura y movimiento.

La aportación científica/tecnológica que se ha identificado ha sido el diseñar y construir una plataforma robótica experimental en condiciones estables, que permita garantizar la neurorrehabilitación de un miembro superior en pacientes con discapacidad de movimiento voluntario, con las siguientes características:

1. Caracterización de movimientos anatómicos (cinemáticos) y espacio-temporales a partir de la tarea de movimientos específicos biomecánicos del hombro, codo y la muñeca.
2. Se realiza un procedimiento para análisis de movimiento de acuerdo con el factor de forma de las señales biomédicas que permita definir la condición del paciente.
3. Se establece un procedimiento de análisis de desempeño de la interacción paciente-robot.
4. Se realiza una estrategia de planificación de la tarea espacio-temporal como consigna de movimiento (posición y velocidad).
5. Se trabajó con una técnica de control estable y óptima que considera la dinámica intervenida del dispositivo háptico.

Para llevar a cabo el experimento se contó con una plataforma que consiste en un dispositivo háptico PHANToM Premium 1.0 [14]; el dispositivo tiene características de baja inercia y fricción articular (nula memoria mecánica), el movimiento consiste en una tarea constituida por trayectoria óptima que conforma el caso de uso (en este caso es un laberinto en un espacio de trabajo del robot y configuraciones admisibles del paciente) el algoritmo de corrección de error de posición y velocidad articular está basada en la ley de control por modos deslizantes de segundo orden.

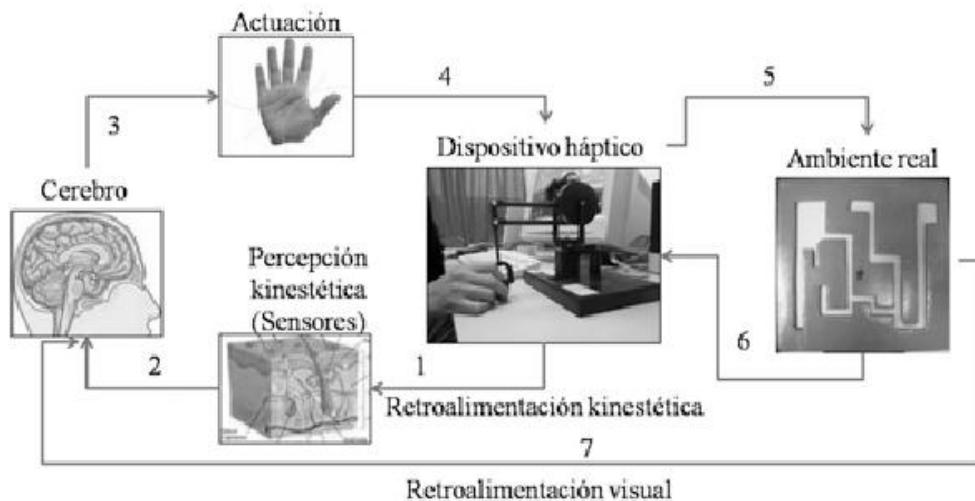




El propósito de la plataforma computacional que se usó para realizar la neurorrehabilitación; se centró en emplear estrategias de guiado háptico pasivo [15] para apoyo en la neurorrehabilitación de pacientes con discapacidad motriz.

En esta investigación el sistema de interacción física hombre-interface a través de un dispositivo háptico, requiere por un lado, la participación humana y para que se llevará a cabo se pensó en el diseño de un sistema de interacción que permite la aplicación de dos guiado háptico: activo y pasivo. El primero permite al paciente guiar al sistema en el espacio de operación de la tarea, además se tiene retroalimentación kinestésica y táctil. En el segundo el paciente es guiado por el dispositivo háptico en el espacio de operación de la tarea implementando estrategias de control de movimiento. Cabe destacar que la memoria kinestésica del humano considera la habilidad de recordar con exactitud la posición y la velocidad de desplazamiento del miembro superior que se esté rehabilitando. En la figura No. 1.1 se ilustran los elementos que conforman un sistema de guiado háptico en el que un paciente interactúa con el ambiente real definido por un laberinto [14].

**Figura No. 1.1** Diagrama esquemático del sistema de guiado.



**Fuente:** Diseño de D.C. Omar Arturo Domínguez-Ramírez 2013

A continuación, se describen cada uno de los elementos:

1. El operador humano es estimulado Kinestésicamente por medio del dispositivo háptico; con esto los músculos, tendones y articulaciones interactúan para enviar información al cerebro.
2. El cerebro procesa la información de la tarea de guiado y se almacena en la memoria kinestésica.
3. La información procesada en el cerebro envía señales al sistema motor y sensorial de tal manera que el operador humano puede obtener la habilidad de controlar su fuerza kinestésica e influir en el dispositivo háptico con mayor capacidad de adaptación.
4. El operador humano es guiado por el dispositivo háptico por medio de la ley de control robusta y pasiva a través del entorno real de un laberinto en que la posición y velocidad del operador humano tiendan a ser las del dispositivo.
5. Debido al dispositivo háptico que está dotado de sensores de posición y velocidad (codificadores ópticos) se conoce con precisión el movimiento en tiempo real del efector final del dispositivo.
6. El entorno real donde se realiza la navegación del ser humano y el dispositivo háptico genera una fuerza de oposición al movimiento del efector final en el dispositivo háptico; cuando se intenta manipularlo y este reacciona al intentar limitar el movimiento planificado en condiciones óptimas que permite inducir el estado de neurorrehabilitación.
7. Retroalimentación visual real, esta información es enviada al cerebro del operador humano durante la interacción del dispositivo y correlaciona con la información kinestésica, para establecer mejores criterios durante la acción de guiado pasivo.

La dinámica del dispositivo háptico, a través de la plataforma PHANToM 1.0 se considera además del software, hardware y del ser humano con quien se realizará la prueba, se cuenta con otras variables, tales como: físicamente el robot entra en contacto con un objeto que deberá identificar las coordenadas articuladas para establecer la dinámica del mismo en movimiento.

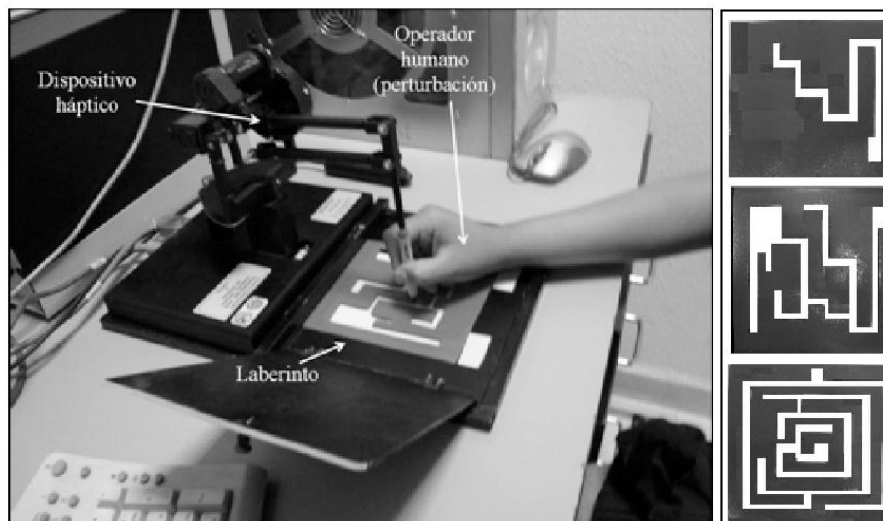
El operador humano, el paciente con movimiento involuntario, interactúa con el sistema donde representa señales de control del guiado háptico, donde se denota la interacción humano-robot. Internamente con apoyo del software en C++ se guardan las coordenadas de la matriz jacobiana y vector de fuerza en un archivo.dat.



El diseño de la ley de control para guiado háptico pasivo, debe cumplir con ciertos objetivos tales como: estabilidad en la interacción hombre-máquina, robustez ante las altas perturbaciones generadas por el operador humano con condiciones de discapacidad de movimiento. Al influir con el principio de neurorrehabilitación a partir de una caracterización, análisis biomecánico y planificación de movimiento definido como una tarea de navegación guiada. Para dar cumplimiento a esta estrategia se realiza a través del control basado en teoría de modos deslizantes de segundo orden. Para llevar a cabo la estrategia de control definida como “diseño y pruebas de estabilidad” que tiene como método de Lyapunov y principio de pasividad.

El caso real que se utilizó fue a partir de una solución de laberintos donde el operador humano realiza la tarea a través del dispositivo háptico usando una tableta con el diseño de un laberinto (ver figura No. 1.2).

**Figura No. 1.2** Plataforma experimental (solución robótica de laberintos).



**Fuente:** Laboratorio de Robótica Avanzada e Interfaces Hápticas. UAEH-ICBI-CITIS

El paciente es estimulado de manera kinestésica (músculos, tendones y articulaciones), en la biomecánica muñeca-codo-hombro, a través del dispositivo háptico en un lazo de control no lineal de movimiento; sin embargo, el ambiente con el que interactúa es real, definido por un laberinto de madera diseñado a partir del espacio de trabajo del dispositivo háptico, las configuraciones de la biomecánica humana y la caracterización del movimiento del paciente. La trayectoria planificada consiste en la solución autónoma del laberinto con el paciente en el lazo.

Por otro lado, la planificación de la tarea para el guiado háptico, el paciente es guiado por el efector final del dispositivo háptico en un entorno real definido por laberintos: el tiempo de ejercicio es de 323.5 segundos, es decir, 5.39 minutos de acuerdo a la velocidad de desplazamiento en condiciones de rehabilitación.

La planificación de trayectoria que constituye la tarea de solución del laberinto está diseñada a partir de polinomios de quinto grado que permiten lograr la convergencia en tiempo finito y el control fino de la velocidad, atenuando la influencia de la dinámica inercial del sistema hombre-robot, equivalente en cada articulación del dispositivo en cada cambio de dirección en la solución.

Los resultados del experimento se obtuvieron a través de realizar la tarea con personas sanas y pacientes con discapacidad de movimiento en miembros superiores. El proceso de diagnóstico y rehabilitación consiste en que el paciente realice 12 ejercicios con diferentes condiciones de control, tales como:

1. El paciente guía al dispositivo a través del laberinto de madera, es decir, el ejercicio se realiza en lazo abierto (sin control); de esta manera el paciente tiene control total de sus movimientos.
2. El paciente es guiado por PHANTom 1.0 (guiado háptico pasivo) considerando la ley de control.
3. El paciente guía nuevamente al dispositivo háptico en lazo abierto (sin control), con la finalidad de evaluar su aprendizaje (re-educación) y rehabilitación.

El éxito y la novedad de esta propuesta se basa en el principio básico de la planificación de movimiento a partir de una caracterización experimental y análisis en el desempeño biomecánico del paciente, previo a la ejecución de la tarea de neurorrehabilitación robótica. Todo este trabajo impacta en la rehabilitación de los pacientes con discapacidad de movimiento en miembros superiores que se verá reflejado en el avance del paciente siendo disciplinado en el proceso.

Cabe destacar que este tipo de estudio sólo se ha llevado a cabo con un máximo de 8 personas en donde se obtienen datos de la realización de la tarea. Esta investigación consiste en proporcionar información con un número más amplio de usuarios, con la finalidad de valorar la interfaz y el sentir del usuario.

Por otro lado, para realizar esta investigación se tomó como referencia la planificación de una tarea con guiado háptico y posteriormente se realizó una



evaluación de la interfaz con base en el protocolo NASA TLX (Ames Research Center) (Task Load Index).

A la fecha no se han encontrado investigaciones donde se hayan evaluado los datos emitidos a través de la interfaz Hombre-Robot con base al protocolo NASA TLX, siendo esta una oportunidad de exploración que permita identificar los cambios en las diferentes sub-escalas que tiene marcado el protocolo NASA TLX.

El protocolo NASA TLX nos permite medir los factores que son relevantes a las experiencias subjetivas de la carga de trabajo y la definición de evaluación formal de la carga de trabajo a través de una variedad de actividades. Incluye información sobre cómo las personas formulan opiniones sobre la carga de trabajo y la forma en que expresan sus evaluaciones subjetivas utilizando escalas de calificación.

La carga de trabajo sigue siendo una importante entidad, prácticamente relevante y medible. Abundan las técnicas de evaluación de la carga de trabajo; sin embargo, las calificaciones subjetivas son los métodos más utilizados y son los criterios con los que se comparan otras medidas. En entornos operativos, uno de los problemas encontrados con el uso de escalas de evaluación subjetivas ha sido una gran variabilidad entre sujetos. La técnica de calificación por el cual se reduce la variabilidad. Otro problema ha sido que las fuentes de trabajo son numerosas y varían entre las tareas, las fuentes de trabajo.

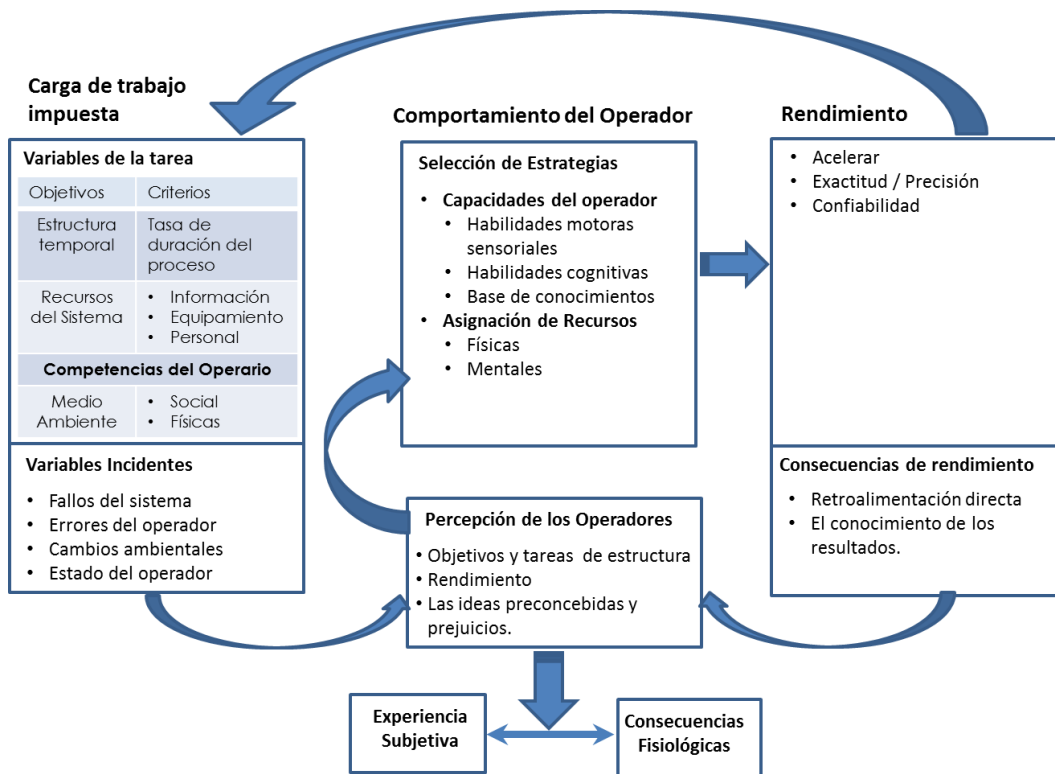
La técnica de calificación que utiliza el protocolo NASA TLX, es multidimensional y proporciona un proceso por el cual especifica fuentes de carga de trabajo relevantes para una tarea dada que pueden ser identificados y considerados en el cálculo de una calificación global de carga de trabajo. Se combina la información acerca de estos factores, reduciendo algunas fuentes de variabilidad entre sujetos que son experimentalmente irrelevantes, y haciendo hincapié en la contribución de otras fuentes de variabilidad que son experimentalmente relevantes.

La utilización del protocolo NASA TLX en las organizaciones permite medir la carga de trabajo que representa hipotéticamente, identificando el costo incurrido por un operador humano para alcanzar un determinado nivel de rendimiento. Por lo tanto, la definición de la carga de trabajo se centra en el hombre, en lugar de centrarse en la tarea [16] [17]. Una experiencia subjetiva del operador de la carga de trabajo resume las influencias de muchos factores además de las exigencias objetivas impuestas por la tarea. Por lo tanto, la carga de trabajo no es una



propiedad inherente, sino que surge de la interacción entre los requisitos de una tarea, las circunstancias en las que se lleva a cabo, y las habilidades, comportamientos y percepciones del operador. Desde que algunas variables aparentemente no relacionados se pueden combinar para crear una subjetiva en la experiencia de trabajo [16] como se puede identificar en el marco conceptual en sus diferentes fuentes y modificadores de la carga de trabajo (ver Figura No. 1.3).

**Figura No. 1.3** Marco conceptual de las variables relacionadas que influyen en el rendimiento humano y carga de trabajo.



**Fuente:** Sandra G. Hart; Aerospace Human Factors Research Division; NASA-Ames Research Center; Moffett Field. California. Diseño del diagrama Rosario Barrera-Gálvez & Omar Arturo Domínguez-Ramírez 2014

En este caso, la carga de trabajo impuesta se refiere a la situación encontrada por un operador. La intención demandada por una tarea es creada por sus objetivos, la duración, la estructura, los recursos humanos y recursos que son proveídos por el sistema. Las demandas reales impuestas por una tarea durante su ejecución por un operador específico pueden ser modificadas por una serie de factores (por ejemplo, el medio ambiente, los fallos del sistema, los errores del operador) que son únicas para ese suceso. Estos factores pueden contribuir accidentalmente ya

sea de fuentes sutiles o sustanciales de la variabilidad de la carga de trabajo que impone la tarea de una interpretación a la siguiente.

Las respuestas del sistema se refieren a la conducta y los logros del sistema hombre-máquina. Los operadores están motivados y guiados por las exigencias impuestas, sino que su comportamiento también se reflejan sus percepciones a cerca de los que ellos esperaban hacer y las estrategias, esfuerzo y el sistema de recursos empleados para lograr los objetivos de la tarea. Los operadores ejercen esfuerzo en una variedad de maneras. El esfuerzo físico es el más fácil de conceptualizar, observar y medir, sin embargo, su importancia en sistemas avanzados está disminuyendo. El esfuerzo mental sirve como una fuerte variable entre los estímulos y las respuestas mensurables medibles, pero es difícil de cuantificar directamente. El rendimiento del sistema representa el producto de las acciones de un operador y las limitaciones, capacidades y las características del sistema controlado. La retroalimentación del rendimiento proporciona a los operadores información acerca de su éxito en el cumplimiento de los requisitos de la tarea, lo que les permite adoptar diferentes estrategias o ejercer diferentes niveles de esfuerzo para corregir sus propios errores.

#### 1.4 Justificación

Los sistemas de interacción física hombre-robot, representan herramientas tecnológicas de entrenamiento de alto desempeño; sus aplicaciones en cirugía, manejo de herramienta, entretenimiento y operación remota de sistemas robóticos complejos, así como de vehículos móviles no tripulados, los cuales permiten validar el interés de la comunidad científica en proponer estrategias nuevas y novedosas en construcción, planificación, control, decisión en condiciones de contingencia y operación en ambientes con incertidumbre.

En la literatura se reportan diversas contribuciones al respecto, así como estrategias que validan el desempeño, algunas corresponden a la medición de variables físicas de interacción, sin embargo, la gran mayoría de las propuestas constituyen el uso de protocolos con tendencia subjetiva que dependen de la percepción del usuario en el desarrollo de una tarea de entrenamiento; no existe trabajo reportado que permita conocer el desempeño en una interfaz de esta naturaleza y que considere una correlación entre las variables físicas cuantificadas



con la percepción propia del robot y la medición de la carga de trabajo y nivel de estrés que el operador describe en el desarrollo de dicha actividad.

La realización de este proyecto permitió una evaluación del comportamiento del ser humano, utilizando el método de base en la carga de trabajo con la interacción basada en el protocolo NASA TLX [12] a partir de los indicadores de esfuerzo, frustración, carga mental, carga temporal y estrés, y su relación con la usabilidad y la utilidad en sistemas de interacción hombre– robot; además de las variables de medio ambiente (luz, ruido, humedad y temperatura), lo que permitió identificar los cambios de las personas que participaron en sus signos vitales antes y después de realizar la tarea.

#### **1.4.1 Objetivo general**

Caracterizar y evaluar, a partir de la relación entre el usuario, la interfaz háptica y las condiciones ambientales durante una tarea de interacción física basada en exploración y guiado kinestésico local a través de un sistema de interacción física Hombre-Robot usando el protocolo NASA TLX para medir la carga de trabajo.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Diseñar un ambiente virtual que permita realizar la tarea de navegación con guiado kinestésico local para un miembro superior con movimiento involuntario, utilizando el dispositivo háptico Phantom Omni.
2. Clasificar los elementos necesarios para llevar a cabo la tarea de navegación con guiado kinestésico, en la interfaz de un hipertubo en 3D activo y una circunferencia en activo y pasivo.
3. Diseñar una encuesta que permita mediar las sub-escalas del protocolo NASA TLX durante la fase de evaluación posterior a la tarea de navegación con guiado kinestésico.
4. Ejecutar la tarea de navegación de guiado kinestésico, tomando datos de signos biológicos pre y post intervención y aplicar el instrumento a 248





personas que realicen la tarea de navegación con guiado kinestésico, mediante el protocolo NASA TLX.

5. Desarrollar los medios, archivos y programas necesarios para captar, almacenar y procesar los datos captados en la aplicación del instrumento del protocolo NASA TLX; medio ambiente (luz, temperatura, humedad relativa y sonido) y parámetros de la plataforma (movimiento, fuerza y colisión) durante la tarea de navegación con guiado kinestésico mediante la interfaz de interacción física hombre-robot.
6. Realizar el análisis de los datos obtenidos a través del protocolo NASA TLX y los datos generados por los Phantom Omni para evaluar el desempeño de la interfaz de interacción física Hombre-Robot realizando gráficos y análisis estadístico.
7. Validar el rendimiento de la interfaz programada para el guiado háptico en sus dos modalidades Activo y Pasivo.

### **1.5 Hipótesis**

Hipótesis de trabajo 1 (Ht1). Existen variables que condicionan el óptimo desarrollo de la carga de trabajo del usuario.

Hipótesis de trabajo 2 (Ht2). Existe nivel de error del usuario en la tarea de navegación con guiado kinestésico con el dispositivo háptico Phanthom Omni a través del protocolo NASA TLX.

### **1.6 Descripción del problema**

Para sistemas de interacción física hombre robot, los esquemas clásicos de evaluación corresponden a la medición de las variables físicas que describen el desempeño del sistema robótico, particularmente la convergencia y la energía de intercambio. Sin embargo, diversos resultados obtenidos de manera aislada permiten observar que el desempeño no sólo depende de la tarea definida en el robot como una consigna de movimiento, sino también de la percepción del usuario en el uso de esa interfaz. Los criterios empleados en interfaces hombre máquina corresponden a indicadores de usabilidad y utilidad, no así cuando hay una interacción física.



En esta tesis se busca encontrar **“las variables que condicionan el óptimo desarrollo de la carga de trabajo y el nivel de error del usuario”**. Con el propósito de obviar variables que pueden tener efectos en los indicadores resultantes, se propone instrumentar las variables físicas ambientales (iluminación, humedad relativa, temperatura y ruido), así como signos vitales.

Por recomendación en revistas arbitradas; se realizó una evaluación de plataformas con estas características y en esta investigación se realizó una evaluación extensiva en una muestra de personas que se asumen sanas de aproximadamente 248 personas, y verificar el desempeño global con análisis estadístico y curvas de distribución a partir de una base de datos en IBM-SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) y MatLab (MATrix LABoratory) con perspectivas de predicción y diagnóstico como trabajo futuro.

### 1.7 Descripción de la posible solución

Para la realización de esta investigación se buscó, en primer lugar, contar con un dispositivo háptico y una aplicación computacional dependiente de una computadora con el cual evaluar, para eso se diseñaron y desarrollaron dos aplicaciones computacionales, escritas en lenguaje de programación C++ versión 6.0; una es un donde el usuario realizó el entrenamiento previo al uso del entorno virtual háptico utilizando un hipertubo en un plano de 3D en activo y una circunferencia en activo y pasivo. Esto a través de una computadora con la aplicación computacional en 3D y los programas que permiten la conexión del dispositivo háptico versión Phantom Omni.

En segundo lugar; se realizó la aplicación de una encuesta diseñada con el protocolo NASA TLX, además de guardar datos biológicos como sus signos vitales antes y después de la realización de la tarea y posteriormente se analizaron los datos captados a través de IBM-SPSS ver 21 y MatLab para identificar una correlación donde se identificó si el usuario es capaz de realizar la tarea de carga de trabajo en sus dos dimensiones: demandas solicitadas a las personas (mentales, físicas y temporales) y la interacción de la persona con la tarea (esfuerzo, frustración y rendimiento) además de medir los parámetros ambientales como temperatura, humedad relativa y nivel de iluminación en el área de trabajo, a través de una tarea de navegación en un ambiente virtual dinámico tridimensional.



Se ha identificado que existen diferentes estudios los cuales se han enfocado en el entrenamiento de operadores apoyados por dispositivos hápticos para realizar diferentes tareas, uno de estos estudios fue realizado por Dan Powell, quién propone un guiado háptico apoyado de un estímulo visual, ya que en estudios anteriores han demostrado variaciones importantes en los niveles de entrenamiento al combinar la respuesta kinestésica y una guía visual.

Dan Powell propuso una clasificación para comparar las múltiples implementaciones de las plataformas de entrenamiento, así como el diseño de un modelo que permitirá la implementación de plataformas de entrenamiento más complejas. Compararon la eficiencia de 4 plataformas de entrenamiento diferentes en un estudio realizado a 50 personas en dos diferentes tareas de guiado. Los resultados mostraron que las tareas de guiado háptico deben ser dinámicas, y mantener una baja carga de trabajo. Cabe mencionar que la evaluación objetiva de la carga de trabajo de los operadores, fue realizada mediante el protocolo de evaluación NASA TLX [12] justo después de llevar a cabo las tareas de guiado [18].

Algunas tareas de guiado, específicamente el seguimiento de una trayectoria, tienen como finalidad la realización óptima de la antes mencionada por parte del operador.

Es posible que el operador logró esto de manera natural a través de la práctica, sin embargo se puede agilizar la curva de aprendizaje con la ayuda de los dispositivos hápticos, los cuales brindan una respuesta kinestésica la cual sirve como una guía física para el operador, esto por supuesto no garantiza un aprendizaje real, ya que el operador puede llegar a ser dependiente del dispositivo háptico para la realización óptima de la trayectoria.

Dan Powell realizó un nuevo estudio donde se valió del NASA TLX para tener una perspectiva de la carga de trabajo que le generaba al operador ser guiado por el dispositivo háptico, desafortunadamente en las pruebas piloto, la evaluación NASA TLX no fue aplicada de manera correcta a los participantes y por lo tanto los resultados de está no fueron significativos [19].



## 1.8 Contribución de la tesis

Es importante mencionar la investigación que se desarrolló no se ha realizado con muestras amplias y que sólo deja ver datos de algunos participantes que en ocasiones no son resultados representativos.

Los resultados la investigación podrán ser publicados y presentados en congresos y simposios del área de la salud y ciencias biomédicas en los ámbitos nacional e internacional, así como revistas indexadas en el Journal Citation Report e ISI Thomson.

Se ha diseñado un proyecto que incluye la compra de Phantom Omni en el Instituto de Ciencias de la Salud de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, con la finalidad de establecer una línea de investigación en el Centro Latinoamericano de Estudios Médicos por Simulación y realizar mediciones de los estudiantes que tienen que realizar prácticas con los simuladores y el brazo robótico, donde se identificará el nivel de estrés.

Se trata de un tema de gran relevancia en Robótica que se ha venido trabajando en el Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería en los últimos 10 años y se encuentra vinculado al Proyecto “Laboratorio para la caracterización, análisis biomecánica y neurorehabilitación robótica de pacientes con discapacidad motriz”, con el cual seguiremos colaborando.

Se pretende contar con un modelo de evaluación de sistemas de interacción física Hombre-Robot y que estos nos sirvan para realizar mejoras en la neurorehabilitación robótica de pacientes con discapacidad motriz.

Asimismo, el día 2 de julio del 2014, se realizó un programa de Televisión en las instalaciones de “Garza TV” con el tema brazo robótico.



# Capítulo 2

## Sistema de Interacción Física Hombre-Robot con dispositivos hápticos



Las interfaces hápticas son dispositivos mediante los cuales el operador humano interactúa con un ambiente virtual generado por una computadora, utilizando tacto y sensaciones kinestésicas. El humano interactúa modificando a su voluntad el ambiente, recibiendo señales de fuerza como respuesta. En este trabajo se emplean el dispositivo háptico PHANTOM Omni, con el propósito de captar el movimiento del guiado háptico local para caligrafía con el uso de dos aplicaciones computacionales tales como un hipertubo virtual y una circunferencia en activo y pasivo para estimulación de los miembros superiores, con la finalidad de evaluar el Sistema de Interacción Física Hombre-Robot mediante el protocolo de NASA TLX.

## 2.1 Dispositivos hápticos

Háptica es el estudio de cómo cambiar el sentido humano del tacto con un mundo generado por una computadora. Un problema de los sistemas actuales de realidad virtual se identifica en la falta de estímulos para el sentido del tacto. La investigación háptica intenta resolver estos problemas y puede ser subdividida dentro de dos subcampos: la retroalimentación de fuerza (kinestésica) y la retroalimentación táctil.

*La retroalimentación kinestésica* es el área de la háptica que trata con dispositivos que interactúan con músculos y tendones, y dan al humano una sensación de que se aplica una fuerza. Estos dispositivos principalmente consisten en robots manipuladores que proporcionan una fuerza de reacción al usuario, con fuerzas correspondientes al ambiente virtual en el que está el órgano terminal.

*La retroalimentación táctil*, es el área que trata con dispositivos que interactúan con las terminaciones nerviosas de la piel, las cuales indican la presencia de calor, presión y textura. Estos dispositivos típicamente han sido usados para indicar si el usuario está en contacto con un objeto virtual. Otros dispositivos de retroalimentación táctil han sido utilizados para estimular la textura de un objeto virtual.

Ivan Sutherland, uno de los fundadores de la realidad virtual, sugirió que el "sentido humano kinestésico es como otro canal independiente del cerebro, un canal cuya información es asimilada de una manera bastante subconsciente" [20].



Esta y otras afirmaciones definieron una línea de acción a los investigadores para desarrollar interfaces hápticas. Añadiendo un canal de entrada independiente, la cantidad de información que es procesada por el cerebro es aumentada. El aumento en la información reduce el error y el tiempo tomado para completar una tarea. También reduce el consumo de energía y la magnitud de las fuerzas de contacto usadas en una situación de tele operación [21].

Para el diseño y construcción de una interfaz háptica, es necesario considerar las características anatómicas y psicológicas del humano, a partir de ello se describen los métodos para generar la fuerza de reacción, el ambiente virtual y las técnicas de control a utilizar [22].

Las interfaces hápticas tienen diversas aplicaciones, dentro de las cuales se encuentran: rehabilitación, entrenamiento, cirugías, exploraciones, diagnóstico médico y fisioterapia.

Para el desarrollo de esta investigación se consideró el diseño e integración de una interfaz háptica que garantizó realismo y estabilidad durante la exploración de objetos y trayectorias en el ambiente virtual.

## 2.2 Dispositivo hápticos PHANToM

Es importante presentar algunas definiciones de la interfaz háptica PHANToM [23]: es un brazo robótico articulado con retroalimentación de fuerza que proporciona un medio natural y realista para tocar y manipular objetos en un ambiente virtual 3D y que, mecánicamente, puede ser descrita, respectivamente, como un robot manipulador y ser de 3 o 6 grados de libertad (gdl) con articulaciones en revolución y 3 gdl de retroalimentación de fuerza. Dadas las especificaciones técnicas con que ha sido diseñada permite evaluar algoritmos novedosos de realidad virtual y leyes de control de movimiento, y desarrollar aplicaciones en ingeniería, medicina, robótica y háptica.

El primer dispositivo PHANToM fue diseñado y construido en 1993 por los doctores Thomas E. Massie y Kenneth Salisbury, quienes en ese tiempo eran respectivamente estudiante doctoral y científico principal del laboratorio de inteligencia artificial del MIT (Instituto de Tecnología de Massachusetts), cuyo



trabajo principal de investigación correspondió a la combinación de las tecnologías de la robótica y la háptica.

Actualmente, la compañía “Sensable Technologies”, comercializa la interfaz háptica PHANToM y ofrece cuatro modelos que, gracias a su funcionalidad, permiten resolver las necesidades tanto de investigación como de clientes comerciales; sin embargo, en este trabajo de tesis nos concentraremos en la versión Omni.

### 2.2.1 Tipos de interfaz PHANToM

Los tipos de interfaz PHANToM [24] utilizados comúnmente como dispositivos hápticos, son el PHANToM Premium 1.0 y el PHANToM Omni, los cuales son mostrados, respectivamente, en las figuras 2.1 y 2.2.

El PHANToM Premium 1.0 es un instrumento de alta precisión que provee un espacio de trabajo y fuerza mayor que el resto de los modelos PHANToM. Permite una gama de movimientos muy similares a los que desarrolla la mano; cuenta con 3 (grados de libertad) de lectura de posición y 3 (grados de libertad) de retroalimentación de fuerza.

**Figura No. 2.1** Dispositivo háptico PHANToM Premium 1.0.



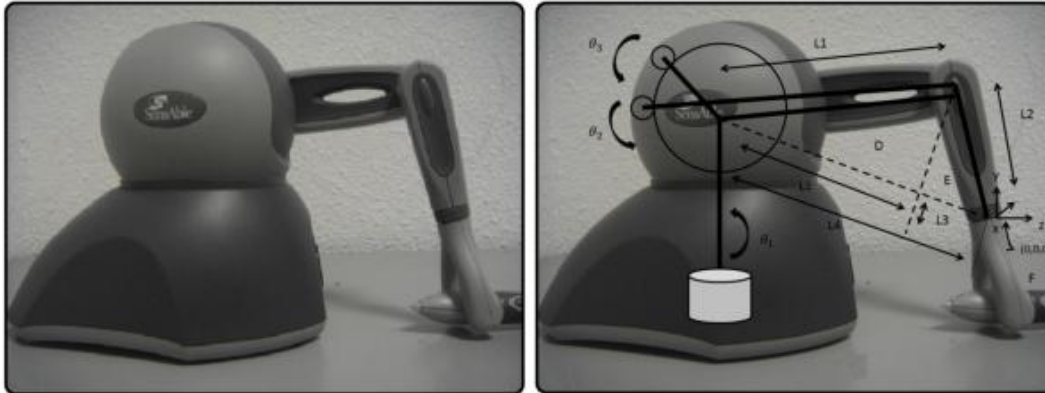
**Fuente:** Laboratorio de Robótica Avanzada e Interfaces Hápticas. UAEH-ICBI-CITIS

Por su parte, el modelo PHANToM Omni ofrece soluciones económicas, es por eso que es el dispositivo háptico más utilizado en la actualidad. Tiene un diseño portable que incluye un anillo para calibración automática del espacio de trabajo.



El PHANToM Omni tiene 6 gdl de lectura de posición y 3 gdl de retroalimentación de fuerza. En cada uno de los casos, se cuenta con tres actuadores.

**Figura No. 2.2.** Dispositivo háptico PHANToM Omni, izquierda: fotografía del dispositivo, derecha: representación de su cadena cinemática.



**Fuente:** Laboratorio de Robótica Avanzada e Interfaces Hápticas. UAEH-ICBI-CITIS

La eficiencia de los dispositivos hápticos PHANToM depende de factores como la baja fricción articular, poca dinámica inercial y movimiento libre de huelgo mecánico (backlash), lo que les permite aproximar al realismo la interacción táctil y kinestésica con objetos virtuales o con objetos reales remotos de baja dinámica inercial. Estas características se muestran en la Tabla No.2.1.

**Tabla No.2.1** Características de las interfaces hápticas PHANToM.

Características	Omni	Premium 1.0
Resolución [mm]	0.055	0.03
Fricción articular [N]	0.26	0.04
Máxima fuerza en extremo final [N]	3.3	8.5

## 2.2.2 Especificaciones técnicas

Para evaluar las técnicas de control en una interfaz háptica Phantom Premium ver 1.0, que permite mejorar el desempeño en tareas de exploración, entrenamiento y telepresencia, se superaron aspectos que consideran la arquitectura abierta del sistema, tales como:

- Interfaz de aplicación programable (GHOST SDK 3.1).
- Clases de los manejadores de entrada y salida del sistema para adquisición de datos de control.

- Código de modelado cinemático y dinámico del Phantom.
- Código en Visual C++ para protección del Phantom.

Para realizar la conexión del dispositivo háptico phantom y una computadora donde se desarrollaron los experimentos se deben considerar los siguientes elementos:

### De Hardware

- Computadora Pentium 4 a 1.4 GHz. y 1 GB de memoria en RAM con dos procesadores.
- Tarjeta de video GForce3.
- Equipo Phantom Omni (Sensable Technologies).

### De Software

- Sistema Operativo versión Windows eXPerience.
- Lenguaje de programación Microsoft Borland Visual C++ ver 6.0<sup>8</sup>.
- MATLAB VER 7.1 (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M) y servicio de especie. Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux<sup>9</sup>.
- Herramienta para elaborar mapas de dibujos. API de GHOST 3.1<sup>10</sup>

## 2.2.3 Base computacional

Los dispositivos hápticos PHANToM, para su funcionamiento, requieren de un equipo computacional tanto de Hardware como de Software. Las especificaciones de

---

<sup>8</sup> Microsoft Visual C++ es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para lenguajes de programación C, C++ y C++/CLI. Visual C++ engloba el desarrollo de aplicaciones hechas en C, C++ y C++/CLI en el entorno Windows. Visual C++ incluye además las bibliotecas de Windows (WinApi), las bibliotecas MFC y el entorno de desarrollo para .NET Framework. Visual C++ cuenta con su propio compilador (de igual nombre) y otras herramientas como IntelliSense, TeamFoundation Server, Debug,... Además provee de bibliotecas propias de cada versión del sistema operativo y sockets. Como otros compiladores, se le pueden añadir nuevas bibliotecas como DirectX, wxWidgets o SDL.

<sup>9</sup> MATLAB Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets). Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL.

<sup>10</sup> Funciones para mover gráficos o modificar los vértices individuales, es decir, editar la geometría de gráficos existentes.

Hardware utilizadas en este trabajo para lograr el funcionamiento de las interfaces PHANToM, se muestran en la Tabla No. 2.2. El Software, que se emplea para desarrollar los experimentos son Visual C++ 6.0, 3D y el Open Haptics Toolkit. Esta plataforma computacional la integran los subbloques de planificación de trayectoria (como el hipertubo en 3D y circunferencia) que se encuentra en la unidad de procesamiento y comunicación.

**Tabla No.2.2** Consideraciones técnicas empleadas para la interfaz Phantom Omni.

Equipo de Cómputo	Omni
Sistema operativo	Windows 7
Procesador	Core i7 a 7.73 GHz
Memoria Ram	3 GB
Tarjeta de video	GeForce 360M

El subbloque de planificación es un algoritmo computacional que genera una secuencia de coordenadas articulares que permiten desarrollar un tubo en 3D de forma curva, con una trayectoria basada en funciones temporales y paramétricas.

El propósito de la planificación de una trayectoria es generar una entrada de referencia para el dispositivo háptico y el robot que ejecute la trayectoria planeada. La planificación puede realizarse de manera local, es decir, la planificación fuera de línea puede ser regulación basada en seguimiento, seguimiento estructurado o seguimiento aleatorio (regulación punto a punto), este tipo de planificación permite seguir trayectorias definidas por una ecuación paramétrica.

En general, las trayectorias son planificadas dentro del espacio de trabajo del usuario, el cual es considerado como el conjunto de configuraciones alcanzables por el usuario dentro del espacio de trabajo del dispositivo háptico.

### 2.3 Descripción del protocolo NASA TLX.

Podemos afirmar que de las transformaciones más importantes en el mundo del trabajo es el advenimiento del trabajo mental. Estando presentes la introducción de la informática y automatización de procesos se genera un distanciamiento entre el ser humano y el objeto de trabajo que puede dar lugar a niveles de exigencia que van más allá de las capacidades humanas, en concreto, de las capacidades cognitivas y de toma de decisiones.



La introducción de nuevas tecnologías si bien produciría un supuesto alivio en el aspecto físico produce también un aumento de la exigencia cognitiva. En primer lugar, el desarrollo tecnológico, sobre todo de la informática, ha hecho que los artefactos que se diseñan hoy tengan un nivel de automatismo que les hace candidatos a ser considerados como sistemas cognitivos por sí mismos, casi al mismo nivel que los seres humanos, en el sentido de que tienen una dinámica propia que es independiente muchas veces de la actuación que los seres humanos tienen sobre ellos. En segundo lugar, se considera que la conducta humana está modelada por el contexto socio-técnico en el que ocurre y no sólo por las peculiaridades del sistema interno de procesamiento de la información humano. La diferencia fundamental entre el ser humano y el artefacto, considerados ambos como sistemas cognitivos, es que el artefacto es diseñado por el ser humano, mientras que éste no se diseña y se modifica por un proceso que llamamos aprendizaje.

En la actualidad, la **evaluación de la carga mental** es un aspecto central en la investigación y el desarrollo de sistemas hombre-máquina que permitan obtener grados más altos de bienestar, satisfacción, eficacia y seguridad en el trabajo, objetivos fundamentales de la ergonomía.

Por carga mental de trabajo se entiende la diferencia entre las demandas cognitivas de un puesto de trabajo o una tarea y la capacidad de atención del trabajador. La carga mental experimentada por un trabajador es una función compleja y personal donde intervienen las características de la tarea y esfuerzo invertido para la realización de una tarea, que depende de la motivación y otros factores. En este sentido, existe un acuerdo general en admitir que la «carga mental» es un concepto multidimensional. Aunque se ha propuesto un número variable de dimensiones, parece existir cierto acuerdo en que la carga, fundamentalmente la subjetiva, se debe a tres grandes áreas o fuentes. La primera englobaría todos los aspectos relativos a la presión temporal de la tarea (tiempo disponible, tiempo necesitado).

La segunda estaría formada por variables que hacen referencia a la cantidad de recursos de procesamiento que demanda la tarea (mental, sensorial, tipo de tarea, etc.). Por último, la tercera dimensión general de carga se relacionaría con aspectos de naturaleza más emocional (fatiga, frustración, nivel de estrés, etc.).



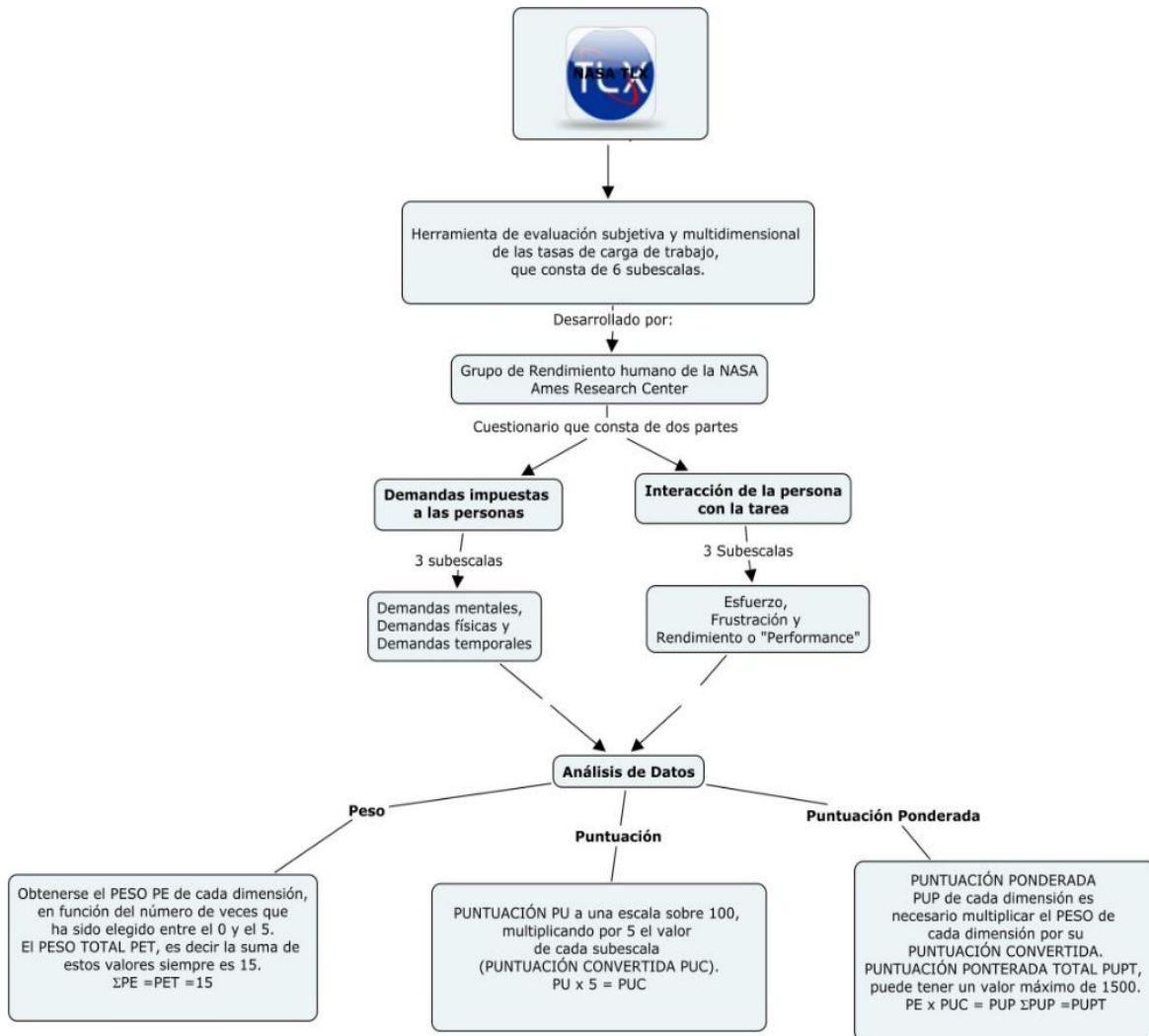
Los procedimientos subjetivos de estimación de carga mental asumen que un mayor gasto de capacidad está asociado con los sentimientos subjetivos de esfuerzo, y que éstos pueden ser evaluados adecuadamente por los individuos. Existe una gran variedad de procedimientos subjetivos que se han aplicado en la evaluación de la carga mental (Escala de Cooper-Harper, SWAT (Subjetive Workload Assessment Technique), NASA-TLX (Task Load Index) y WP (Workload Profile). Por sus características particulares (mínimos requisitos de implementación, elevada aceptación por los trabajadores, validez y fiabilidad probada empíricamente, etc.) los instrumentos subjetivos son los utilizados con más frecuencia en contextos aplicados ya que ofrecen la ventaja, frente a los métodos objetivos de valoración psicofisiológica, el no ser intrusivos porque suelen aplicarse una vez que se ha realizado la tarea.

Existen varios procedimientos subjetivos [25] para medir la carga mental y uno de los más destacados es la prueba de índice de carga de la NASA (NASA-TLX por sus siglas en inglés), que es utilizado en la NASA para evaluar la carga mental. Este instrumento ha mostrado ser adecuado cuando se utiliza para analizar tareas que van desde un complejo simulador de vuelo hasta tareas de manipulación de objetos. Éste índice ofrece una medición de seis dimensiones para evaluar la carga de trabajo mental, es decir, mediante la evaluación de: 1. Demanda Mental; 2. Demanda Física; 3. Demanda Temporal; 4. Esfuerzo; 5. Frustración y 6. Rendimiento en una escala bipolar de veinte niveles.

El protocolo NASA TLX, permite evaluar la carga de trabajo experimentada y las consecuencias fisiológicas que reflejan el efecto de un operador en la realización de una tarea. Es la experiencia subjetiva de la carga de trabajo la que se capta a través de la aplicación de la encuesta. Como se puede observar en el mapa conceptual de la Figura No. 2.3.



**Figura No. 2.3** Mapa conceptual del protocolo NASA TLX



**Fuente:** Elaboración propia.

Se realiza una breve definición del protocolo NASA-TLX, para evaluar la carga mental del usuario al realizar tareas temporales y espaciales simples en un sistema de guiado háptico a través del dispositivo PHANToM Omni.

En la tabla No. 2.3, se definen las sub-escalas del NASA TLX y sus posibles preguntas.

**Tabla No. 2.3** Descripción de las sub-escalas del protocolo NASA-TLX.

Titulo	Puntos	Definición	Preguntas
Demanda mental	Bajo/ Alto	Corresponde a las características de la tarea y su planificación	¿Cuánta actividad mental y perceptiva se requiere (por ejemplo, el pensamiento, la decisión, recordando, mirando, buscando, etc)? Era la tarea fácil o exigente, simple o compleja y exigente.
Demanda física	Bajo/ Alto	Implica efectos sobre el esfuerzo.	¿Cuánto se requiere de actividad física (Por ejemplo: empujar, tirar, girar, controlar, activar, entre otros)? Era la tarea fácil o exigente, lenta o rápida, floja o extenuante, reparadora o laboriosa.
Demanda temporal	Bajo/ Alto	Se refiere al tiempo en la realización de la tarea.	¿Cuánta presión de tiempo no se siente debido a la actividad o ritmo de las actividades o de las actividades requirieron de más elementos? ¿El ritmo lento y tranquilo o rápido y frenético?
Esfuerzo	Bajo/ Alto	Acción física para realizar una tarea.	¿Qué tan difícil tuviste que trabajar (mentalmente y físicamente) para lograr el nivel de rendimiento?
Frustración	Bueno/ Malo	Respuesta emocional relacionada con la ira y la decepción, que surge de la percepción de resistencia al cumplimiento de la voluntad individual	Cómo inseguro, desalentado, irritado, hizo hincapié en molesto contra seguro, satisfecho, relajado y complaciente, como se sintió durante la tarea.
Rendimiento	Bueno/ Malo	Resultado obtenido en la realización de la tarea.	¿Qué tan exitoso crees que estabas en el cumplimiento de los objetivos de la tarea fijada por el experimentador (o usted mismo)? Cómo estabas satisfecho con el rendimiento en lograr estos objetivos.

**Fuente:** Sandra G. Hart; Aerospace Human Factors Research Division; NASA-Ames Research Center; Moffett Field. California



Sin embargo, según Sandra G. Hart no es probable que la experiencia de un operador (Usuario) de carga de trabajo sea una simple combinación de los factores pertinentes. Por otra parte, las calificaciones pueden estar sesgadas por prejuicios. Dado que no es probable que los operadores estén al tanto de todas las variables de las tareas o los procesos que subyacen en sus decisiones y acciones, sus experiencias no reflejan todos los factores pertinentes.

Por lo tanto, trazamos una distinción entre el nivel de carga de trabajo que el diseñador del sistema tiene la intención de imponer, las respuestas de un sistema hombre-máquina específicas para una tarea y subjetiva la experiencia de los operadores.

La importancia de las experiencias subjetivas se extiende más allá de su asociación con subjetividad de las calificaciones. Las experiencias fenomenológicas de operadores humanos afectan el comportamiento posterior, y por lo tanto afectan su rendimiento y las respuestas fisiológicas a una situación. Si los operadores consideran que el trabajo de carga de trabajo de la tarea fuera excesiva, ellos se comportarían como si pensaran que están sobrecargados, incluso aunque las demandas de la tarea son objetivamente bajas, pueden adoptar estrategias apropiadas para una alta carga de trabajo de la situación (por ejemplo, vertimiento de tarea y responder rápidamente), la experiencia psicológica o angustia fisiológica, o adoptar un criterio más bajo para el rendimiento.

### 2.3.1 Métodos subjetivos

Es habitual que las personas emitan juicios de valor sobre la dificultad que entraña la realización de alguna tarea, aunque estas impresiones no suelen cuantificarse o no llegan a ser escritas<sup>11</sup>.

Los métodos subjetivos, son aquellos que requieren una interpretación de la situación basándose en técnicas que si bien pueden ser realmente estructuradas, habitualmente son muy flexibles en cuanto a su diseño y método de aplicación.

Los métodos “subjetivos”, al igual que con los “objetivos” que es una acepción, en numerosas ocasiones, totalmente arbitraria y que se otorga en función de quién

---

<sup>11</sup> Foucault, M. (1975): Vigilar y Castigar, Madrid, Siglo XXI, 1977.



realiza la evaluación o en función del fin de la misma e incluso en función de los resultados. Las herramientas que se pueden usar en los métodos subjetivos pueden ser la:

1. Observación;
2. Encuestas;
3. Entrevistas; y
4. Grupos de Discusión.

Para el desarrollo de esta investigación se diseñó y se aplicó una encuesta basándose en el protocolo NASA TLX.

En los métodos subjetivos, como lo hemos comentado, se requiere que los propios interesados califiquen el nivel de esfuerzo necesario para la realización de una tarea y reflejen una opinión directa acerca del esfuerzo mental exigido con el contexto del entorno del puesto; de la experiencia y las capacidades del operador.

Es de amplia aplicación la evaluación de carga de trabajo debido a su facilidad de uso, su validez (contrastada por correlaciones con criterios de conducta) y su aceptación por parte de los interesados. Además ofrecen la ventaja frente a los métodos de valoración psicofisiológica de no ser intrusivos ya que suelen aplicarse una vez que se ha realizado la tarea.

Por estos motivos son los más utilizados para la medición de la carga de trabajo en situaciones reales, mientras que las medidas de tipo psicológico o fisiológico son aplicadas en situaciones de laboratorio o en escenarios de privacidad.

### **2.3.2 Información proporcionada por calificaciones subjetivas**

En comparación con otros métodos de evaluación de la carga de trabajo [26] [27], la calificación subjetiva puede venir más cerca de tocar la esencia de la carga de trabajo mental y proporcionar lo más generalmente válido y sensible. Ellos constituyen la única fuente de información sobre el impacto subjetivo de la tarea de los operadores e integrar los efectos de la carga de trabajo de los que contribuyen. Sin embargo, hay problemas prácticos asociados con la traducción de una experiencia personal de la carga de trabajo en una calificación de carga de trabajo formalizado. La gente a menudo genera las evaluaciones sobre la dificultad de las experiencias en curso y el impacto de esas experiencias en su bienestar



físico y estado mental. Sin embargo, rara vez se cuantifican recordar o verbalizar estas impresiones fugaces.

De hecho, ellos no pueden identificar su causa o efecto con el concepto de "carga de trabajo" completamente. Son conscientes de su comportamiento y sensación actual y los resultados de los procesos cognitivos, a pesar de que no son conscientes de los propios procesos [28] [29]. Sólo lo más reciente de información se puede acceder directamente a los informes verbales de la memoria a corto plazo o de trabajo.

Por lo tanto, una gran cantidad de información puede estar disponible cuando se produce una experiencia, sin embargo, la experiencia de cada momento se sustituye por la siguiente. La carga de trabajo de una actividad puede recordar o volver a crear, pero la evaluación se limita a lo que sea de información que fue recordada, de paso o deliberadamente, durante la propia actividad. Por estas y otras razones, las valoraciones subjetivas no necesariamente incluyen toda la información relevante y puede incluir información que es irrelevante.

La carga de trabajo es vivida como una consecuencia natural de muchas de las actividades diarias. Sin embargo, un requisito formal para cuantificar una experiencia utilizando escalas de evaluación experimental impuestas no es una actividad natural o común y puede resultar respuestas diferentes cualitativamente.

Por esta razón, Türkşen y Moray [30] propusieron que la "lingüística" menos precisa en el enfoque proporcionado por la lógica difusa puede ser apropiado para la medición de la carga de trabajo porque personas describen naturalmente sus experiencias con los términos y modificaciones verbales (por ejemplo, "alto", "fácil" o "moderado") en lugar de los valores numéricos. Si la carga de trabajo es una construcción significativa, sin embargo, debería ser posible obtener evaluaciones en una variedad de maneras o mediante una tarea realizada o concluida.

Un requisito formal para proporcionar una calificación no anima sujetos a adoptar una forma más cuidadosa el modo de evaluación, para expresar sus juicios en un formato estandarizado, y adoptar los criterios de evaluación impuestos por el experimentador. Evaluaciones de carga de trabajo se dan normalmente con referencia a las escalas arbitrarias marcadas con números o descripciones verbales de las magnitudes representados por valores extremos. Estos a menudo no tienen analógica directa en el mundo físico.



---

Dado que es poco probable que las personas recuerden casos concretos de baja, medio o alto con la carga de trabajo para servir como escala de referencia mental de la etiqueta "carga de trabajo", absolutos juicios o comparaciones complementos a través de diferentes tipos de tareas que no son generalmente significativas, de características que pueden ser medidas en unidades físicas, es posible distinguir entre absoluta, relativa y el valor de juicios de la información objetiva disponible.

Para valores de carga de trabajo, es relativamente más difícil distinguir entre una estimación "objetiva" magnitud y un juicio hecho en comparación con una referencia interna. Calificando formatos que podrían incluir valores numéricos discretos, descriptores alternativos o distancias delimitadas a lo largo continuamente. Por último, la calificación de escalas podría ser unidimensional o multidimensional que requiere juicios sobre las tareas relativas o las variables psicológicas.

### 2.3.3 Fuentes de clasificación de variabilidad

Las calificaciones de carga de trabajo están sujetas a una variedad de tareas y las fuentes específicas del operador de variación, algunos de los cuales se han mencionado anteriormente (por ejemplo, sesgos identificables en poder de los evaluadores o las manipulaciones objetivas de parámetros de la tarea).

Las experiencias de la carga de trabajo en los operadores son difíciles de modificar, pero los procedimientos con que se obtienen las evaluaciones pueden ser diseñados para reducir la clasificación de la variabilidad.

El Protocolo NASA TLX se basa en dos aspectos: el primero tiene una calificación para cada tarea dentro de un rango de 5 a 100 puntos con intervalos de 5 puntos. Estos valores se combinan con el índice de carga de tarea. La cual proporciona la descripción de cada medición que se puede encontrar para ayudar a los participantes a responder con precisión.

El segundo es crear una ponderación individual de estas sub-escalas dejando que los sujetos comparen por parejas basada en su importancia percibida. Esto requiere que el usuario elija la medición que es más relevante para la carga de trabajo. La cantidad de cada sub-escala que cada uno elige es el puntaje ponderado [31]. Esto se multiplica por la puntuación de la escala para cada



dimensión y luego se divide por 15 para obtener una puntuación de carga de trabajo de 0 a 100, siendo el resultado el índice general de la carga de tarea. Muchos investigadores eliminan estas comparaciones por pares, sin embargo, y se refieren a la prueba como "TLX Raw".

Por ejemplo, al seleccionar un par, que sirva para dar el peso que servirá para identificar la variación de la carga de trabajo de la tarea, como se puede ver en la tabla No. 2.4.

**Tabla No.2.4** Ponderación de las sub-escalas con el Protocolo NASA TLX.

<b>Selección de valores de importancia</b>			
DF / DM	DT / DF	DT / FR	DM III = 3
DT/ DM	RP/ DF	DT / EF	DF = 0
RP/ DM	FR/ DF	RP/ FR	DT IIIII = 5
FR/ DM	EF/ DF	RP/ EF	RP I = 1
EF/ DM	DT / RP	EF/ FR	FR III = 3
			EF III = 3
			<b>SUMA = 15</b>

**Fuente:** Sandra G. Hart; Aerospace Human Factors Research Division; NASA-Ames Research Center; Moffett Field. California

Donde:

- |                      |                    |
|----------------------|--------------------|
| DF; Demanda Física   | DM; Demanda Mental |
| DT; Demanda Temporal | OP; Rendimiento    |
| FR; Frustración      | EF; Esfuerzo       |

### 2.3.4 El protocolo NASA TLX

Métodos subjetivos y ponderados de evaluación NASA TLX, herramienta con que se realizará la evaluación de un Sistema de Interacción Física Hombre-Robot.

Este es un procedimiento de valoración multidimensional que da una puntuación global de carga de trabajo, basada en una media ponderada de las puntuaciones en seis sub-escalas, cuyo contenido es el resultado de la investigación dirigida a aislar de forma empírica y a definir los factores que son de relevancia en la experiencia subjetiva de carga de trabajo.

El NASA TLX (Task Load Index) es un procedimiento de valoración multidimensional que da una puntuación global de carga de trabajo, basada en una media ponderada de las puntuaciones en seis sub-escalas, de éstas, tres se refieren a las demandas impuestas a la persona (demandas mentales, físicas y



temporales) y las otras tres se refieren a la interacción de la persona con la tarea (esfuerzo, frustración y rendimiento o performance).

La carga no es una característica inherente a la tarea sino que es el resultado de la interacción entre los requerimientos de la tarea, las circunstancias bajo la que se desarrolla y las capacidades, conductas y percepciones del operador.

Este procedimiento requiere de una breve familiarización previa y consta de una fase de ponderación y de puntuación que consisten en el llenado de un cuestionario, inmediatamente después de realizada la tarea. Una serie de cálculos matemáticos permiten conocer el nivel de carga mental experimentado así como la incidencia de cada factor en el mismo.

A continuación, se describen los pasos para la aplicación y validación del protocolo NASA TLX en un sistema de interacción física hombre-robot:

**Familiarización:** En esta etapa se les da una breve descripción a cada integrante del grupo a participar desde el objetivo del experimento; los dispositivos háptico; la realidad virtual y el llenado del cuestionario NASA TLX, se les entrega el cuestionario a cada participante y se les explica las sub-escalas a evaluar y cómo la deben evaluar. Se les explica la importancia de su compromiso esto para una evaluación exitosa.

**Ponderación:** Se parte de la base de que las fuentes específicas de carga impuesta por las diferentes tareas son determinantes en la experiencia de carga, es decir, de la sensación subjetiva de carga. Para el desarrollo del experimento se determina el grado en que cada uno de los seis factores contribuye a la carga en cada tarea o subtarea específica. El objetivo de esta fase es la definición de las fuentes de carga. La ponderación se hará para determinar cuál es el nivel de estrés del operador y las condiciones ambientales en que se desarrolla la tarea.

La ponderación consiste en definir cada una de las dimensiones a fin de que se comparen por pares (comparaciones binarias) y se elijan para cada par, cuál es el elemento que se percibe como una mayor fuente de carga.

**Puntuación:** En esta fase, las personas valoran la tarea o subtarea que acaban de realizar (manejo de un dispositivo háptico en activo y pasivo) en cada una de las dimensiones. Para ello cuentan con diferenciales semánticos, debiendo marcar



un punto en la escala que se les presenta. Cada factor se presenta en una línea dividida en 20 intervalos iguales y limitada bipolarmente por unos descriptores (por ejemplo: Bajo / Alto), teniendo presentes las definiciones de las dimensiones.

**Conversión:** La bibliografía consultada no hace mención directa de esta fase como tal, pero se le incorporó porque los datos obtenidos a partir de las planillas no tienen aplicación directa, debiendo convertirse. Esta etapa no es necesario realizarla en el campo porque requiere de algunos cálculos sencillos. Existe software específicos (como el NASA TASK LOAD INDEX V1.0) que hacen la conversión automáticamente cuando el operador llena las planillas computarizadas.

A partir de las elecciones hechas en la fase de ponderación, debe obtenerse el PESO PE de cada dimensión, en función del número de veces que ha sido elegido. Este Peso varía entre 0 (cuando una dimensión no fue elegida nunca) y 5 (cuando siempre fue elegido en cada par). El PESO TOTAL PE, es decir la suma de estos valores siempre es 15.

$$\Sigma PE = PE_T = 15$$

A partir de los valores obtenidos en la fase de puntuación, cuyos diferenciales semánticos tienen 20 intervalos, debe reconvertirse esta PUNTUACIÓN PU a una escala sobre 100, multiplicando por 5 el valor de cada sub-escala (PUNTUACIÓN CONVERTIDA PU<sub>c</sub>)

$$PU \times 5 = PU_c$$

Para obtener la PUNTUACIÓN PONDERADA PU<sub>p</sub> de cada dimensión es necesario multiplicar el PESO de cada dimensión por su PUNTUACIÓN CONVERTIDA. La sumatoria de las PUNTUACIONES PONDERADAS es la PUNTUACIÓN PONDERADA TOTAL PU<sub>PT</sub> cuyo valor máximo es de 1500.

$$PE \times PU_c = PU_p$$

$$\Sigma PU_p = PU_{PT}$$

Dividiendo la PUNTUACIÓN PONDERADA TOTAL sobre el PESO TOTAL obtenemos los ÍNDICES DE CARGA DE TRABAJO (ICT o TLX en Inglés). Estos índices varían entre 0 y 100, a mayor índice mayor será la carga mental.



Una de las principales ventajas de este protocolo NASA TLX es su aplicabilidad en el marco laboral real ya que las personas pueden puntuar directa y rápidamente la tarea realizada ya sea justo después de su ejecución o de forma retrospectiva.

Por otra parte, el protocolo NASA TLX puede ser aplicado a gran variedad de tareas: para su validación se aplicó a tareas que incluían el control manual, percepción, memoria inmediata, procesamiento cognitivo y control de sistemas semi-automatizados. En situaciones experimentales (vuelo simulado, control simulado, tareas de laboratorio, aritmética mental, tiempo de reacción de elección, etc.) se ha encontrado que las puntuaciones de carga de trabajo derivadas tienen menos variabilidad interpersonal que las puntuaciones de carga de trabajo unidimensionales; además, las sub-escalas dan valiosa información diagnóstica acerca de las fuentes de carga. Por último, puede mencionarse su rapidez tanto de aplicación como de corrección, que facilita su aplicación a diversas tareas o subtareas, y la ya mencionada capacidad de diagnóstico de las posibles fuentes de carga.

### **2.3.5 Cómo identificar una escala de calificación en un Sistema de Interacción Física Hombre-Robot.**

Para realizar la aplicación del instrumento NASA TLX se pueden definir 5 pasos a seguir:

1. Diseñar del cuestionario en el formato de las 6 sub-escalas, generalmente consta de 6 preguntas.
2. Capacitar al usuario que realizará la tarea de la carga de trabajo que se va a medir y sobre el cuestionario de NASA TLX.
3. Definir la ponderación que se le dará a cada sub-escala.
4. Aplicar el cuestionario a cada uno de los usuarios.
5. Contar con el software que permitirá realizar el análisis de los datos.

El “NASA TLX: Software para la evaluación de la carga mental subjetiva” [32] se puede bajar de la red de internet y existen varias versiones que van desde diseños desarrollados en Microsoft Excel hasta en html y que se ejecutan en la red<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup> [http://ece.eng.wayne.edu/~apandya/Software/NASA\\_TLX/](http://ece.eng.wayne.edu/~apandya/Software/NASA_TLX/)

A continuación, se presenta un ejercicio con el software NASA TLX. EXE que está desarrollado en Microsoft Excel (R); al colocar una marca en cada escala que representa la magnitud (Puntos) de cada factor en la tarea (como se ve en la Imagen No. 2.4) que se realizó al contestar una pregunta de la encuesta se anotan los puntos y se realizan los cálculos para identificar el peso y la media aritmética, posteriormente se realizó lo mismo para cada pregunta.

**NASA Task Load Index**

Hart and Staveland's NASA Task Load Index (TLX) method assesses work load on five 7 point scales. Increments of high, medium and low estimates for each point result in 21 gradations on the scales.

Name	Task	Date
Mental Demand      How mentally demanding was the task?		
Very Low      Very High		
Physical Demand      How physically demanding was the task?		
Very Low      Very High		
Temporal Demand      How hurried or rushed was the pace of the task?		
Very Low      Very High		
Performance      How successful were you in accomplishing what you were asked to do?		
Perfect      Failure		
Effort      How hard did you have to work to accomplish your level of performance?		
Very Low      Very High		
Frustration      How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed were you?		
Very Low      Very High		

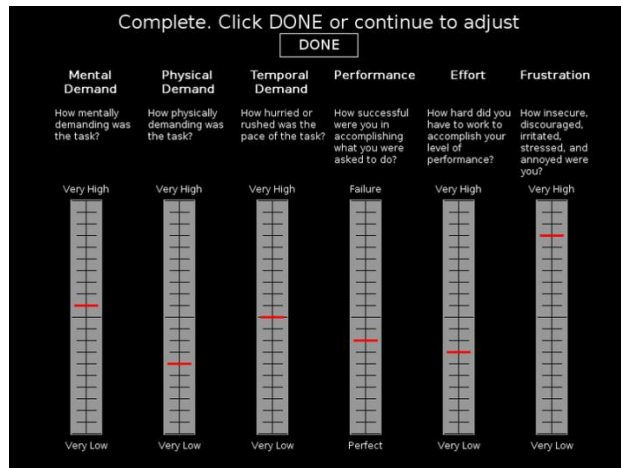
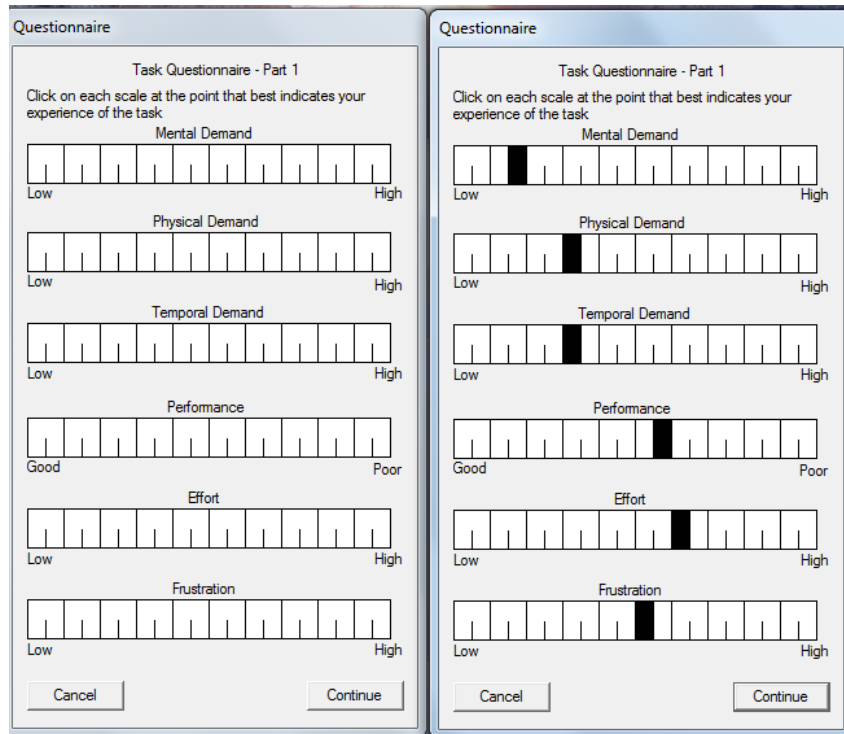


Imagen No. 2.4 Cuestionario NASA TLX

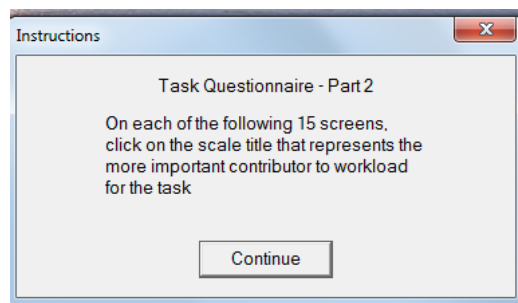
Los datos que son captados en cada sub-escala dependiendo de la pregunta que se haya diseñado en el formato se realiza de manera interna ya sea con el software diseñado para esto el NASA TLX.EXE o bien en Excel de Microsoft. Ver Imagen No. 2.5 Pantalla de captura de datos en el software. Y, posteriormente, se marca en cada cuadro que va de la escala del 5 al 100.





**Imagen No. 2.5** Pantalla de Captura de datos en NASA TLX.EXE

En la aplicación computacional se realizan los siguientes cálculos de forma interna “en cada uno de los siguientes 15 pantallas, haga clic en el Titule escala que representa la contribución más importante a la carga de trabajo para la tarea” como se muestra en la siguiente imagen.



**Imagen No. 2.6** Segunda parte de la aplicación computacional NASA TLX.EXE

En la “Tarea del Cuestionario”, haciendo “clic en el factor que representa la contribución más importante a la carga de trabajo para la tarea”: La demanda física o la Demanda temporal. Y así sucesivamente hasta realizar las 6 comparaciones donde internamente se realizan los siguientes cálculos, como se muestra en la siguiente tabla:



**Tabla No. 2.5** Cálculos internos del NASA TLX.

	Puntos sobre la tarea 1			Puntos (por)	Peso (igual)	Producto
Demanda mental (DM)	Bajo		Alto	<b>30</b>	3	90
Demanda física (DF)	Bajo		Alto	<b>15</b>	0	0
Demanda temporal (DT)	Bajo		Alto	<b>60</b>	5	150
Rendimiento (RP)	Malo		Bueno	<b>40</b>	1	40
Frustración (FR)	Bajo		Alto	<b>30</b>	3	90
Esfuerzo (EF)	Malo		Bueno	<b>40</b>	3	120
					<b>SUMA</b>	<b>490</b>

**PESO TOTAL= 15**

**Fuente:** Cálculos internos del NASA TLX; elaborado por Barrera-Gálvez R. 2014.

En Excel de Microsoft los datos son los siguientes:

**Tabla No. 2.6** Resultados de la aplicación del programa en Excel del NASA TLX

NASA Task Data		
Scale	Value	Weight
Mental Demand	20	0.20
Physical Demand	35	0.27
Temporal Demand	35	0.20
Performance	60	0.13
Effort	65	0.13
Frustration	55	0.07
<b>Total Workload</b>	<b>40.67</b>	

**Fuente:** Programa ejecutado NASA TLX. EXE y son los resultados de la aplicación.

En este ejemplo se realiza la multiplicación de cada valor por el peso y realiza la suma de cada sub-escala donde el resultado es 40.67; la suma del peso es la unidad 1. Lo importante en la traducción de los valores donde la variable de peso no exceda los 15 puntos marcados.



# Capítulo 3

## Metodología del Estudio



A continuación, se describe el procedimiento realizado durante la investigación, desde la fase del diseño de estudio, la selección del instrumento, conteniendo el material utilizado para la concreción del estudio, hasta llegar a los resultados que permiten elaborar una discusión y conclusiones.

### 3.1 Tipo y diseño de investigación.

El presente estudio de investigación y desarrollo tecnológico tiene como objetivo evaluar a un Sistema de Interacción Física Hombre-Robot con base en la carga de trabajo haciendo uso del protocolo NASA TLX a partir de los indicadores de esfuerzo, frustración, carga mental, carga temporal y estrés, y su relación con la usabilidad y la utilidad en sistemas de interacción hombre – máquina; se cuantifican parámetros ambientales como temperatura, humedad relativa y nivel de iluminación en el área de trabajo. Para ello, se propone establecer una tarea de navegación en un ambiente virtual dinámico tridimensional a estudiantes adscritos al Instituto de Ciencias de la Salud de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y se contribuye en adicionar variables en la interacción que hacen más objetiva la calificación de la prueba a partir de gráficos y análisis estadístico.

La investigación se orientó a un estudio de tipo **observacional** con diseño **transversal** (con datos captados únicamente en el momento de la realización de la tarea de navegación con guiado kinestésico mediante el dispositivo Phanthom Omni ), **retrospectivo** (puesto que se observó el fenómeno, tratando de identificar sus antecedentes y causas), **y descriptivo** (de carácter demográfico y estadístico), ya que no hubo intervención por parte del investigador, limitándose a medir y analizar las variables de resultado la evaluación subjetiva y multidimensional de la tasa de carga de trabajo en sus dos dimensiones: demandas solicitadas a las personas (mentales, físicas y temporales) y la interacción de la persona con la tarea (esfuerzo, frustración y rendimiento) además de los parámetros ambientales como temperatura, humedad relativa y nivel de iluminación en el área de trabajo, a través de una tarea de navegación en un ambiente virtual dinámico tridimensional y las variables demográficas [33].

La selección de la muestra y la descripción de la tarea de navegación con guiado kinestésico mediante el dispositivo Phanthom Omni; posteriormente se diseñó el instrumento mediante el protocolo NASA TLX y ejecución de la evaluación que consistió en la toma de signos vitales; realización de la tarea mediante el



dispositivo Phantom Omni; toma de signos vitales al concluir la tarea y realizar el llenado del instrumento NASA TLX; en la tercera fase se realizó la codificación de los datos; se ordenaron los archivos que genera el dispositivo háptico y se realiza el análisis de los datos, validación de los mismos y finalmente la discusión de los resultados para dar sustento a la presente tesis, de acuerdo con la literatura [34].

Para el análisis se recurrió a la estadística descriptiva [35], a partir de herramientas como la distribución de frecuencias, proporciones, medidas de tendencia central, de dispersión y de correlación entre las variables [36].

Primordialmente este estudio identificará y cuantificará a través del protocolo NASA TLX la evaluación subjetiva y multidimensional de la tasa de carga de trabajo en sus dos dimensiones: demandas solicitadas a las personas (mentales, físicas y temporales) y la interacción de la persona con la tarea (esfuerzo, frustración y rendimiento) además de los parámetros ambientales como temperatura, humedad relativa y nivel de iluminación en el área de trabajo, a través de una tarea de navegación en un ambiente virtual dinámico tridimensional.

### **3.2 Universo y muestra**

El Instituto de Ciencias de la Salud (ICSa), cuenta con 7 Programas Educativos de Licenciatura: Medicina, Enfermería, Odontología, Psicología, Farmacia, Nutrición y Gerontología, que buscan dar una formación integral en el área de la salud al estudiante, considerando al individuo no sólo en su aspecto biológico sino como una entidad bio-psico-social.

Sus programas educativos son socialmente aceptados porque cumplen con criterios de pertinencia y de calidad y se nutren en la multi, inter y transdisciplina, como única manera de abordar la atención a la salud desde una perspectiva integral.

Las instalaciones del Centro Latinoamericano de Enseñanza Médica por Simulación (CLEMPS) sirvieron como área física para realizar la investigación y se encuentra ubicado en la 5ta. Etapa del Instituto de Ciencias de la Salud de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, como se muestra en la siguiente imagen.



**Imagen No. 3.1** UAEH-Instituto de Ciencias de la Salud



**Fuente:** <http://www.uaeh.edu.mx/campus/icsa/ubicacion.htm>

La razón de trabajar en esa área es que simula un hospital y físicamente se pueden controlar las condiciones del medio ambiente en la investigación realizada.

Para esta investigación se identificó un universo de 2,773 estudiantes, matrícula del Instituto de Ciencias de la Salud, y se calculó una muestra de esta población finita conocida, determinando 248 participantes, con un margen de error de 0.05 y 95% de confiabilidad; los participantes fueron específicamente de 3 áreas académicas del IC Sa Medicina, Enfermería y Odontología que desearon participar en el estudio y firmaron el consentimiento informado.

Para obtener el número óptimo de participantes, se utilizó el siguiente cálculo de tamaño de muestra para población finita.



**Figura No 3.2** Cálculo de una muestra, para población finita conocida.

**Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo**  
**Maestría en Ciencias Computacionales**  
 USUARIOS A ENCUESTAR  
 Población General

**CALCULO DE TAMAÑO DE MUESTRA PARA POBLACIÓN FINITA**

TAMAÑO DE POBLACION ?                      **2,773** Personas

**CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA PARA DIFERENTES NIVELES DE CONFIANZA**

NIVEL DE CONFIANZA	95 %	96 %	98%	99%	100 %
LIMITE DE ACEPTACION =	1.65	2.05	2.33	2.58	5.00
ERROR ACEPTABLE =	0.05	0.04	0.03	0.02	0.05
TAMAÑO MUESTRA =	248	533	977	1662	1315
% DE COLCHON ?	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
NUEVO TAMAÑO DE MUESTRA =	273	586	1,075	1,828	1,315

**Fuente:** Elaboración propia.

La fórmula que se utilizó para identificar el tamaño de la muestra para población finita conocida [37] es:

$$n = \frac{N z^2 pq}{d^2 (N-1) + z^2 pq}$$

Dónde:

- n = Tamaño de muestra
- N = Población total de participantes
- d<sup>2</sup> = coeficiente de confiabilidad x error estándar
- z= nivel de confianza.
- p= Proporción de casos de la población que tiene las características que se desea estudiar.
- q =1-p proporción de individuos de la población que no tiene las características de interés y por lo tanto representa la probabilidad de obtener al azar un individuo sin estas características.
- i<sup>2</sup> = Error muestral.



Se dice que ES un estudio *transversal* debido a que se realiza en un solo momento del tiempo; experimental, por la interacción entre el usuario y la tarea de navegación con guiado kinestésico mediante el dispositivo Phanthom Omni; *analítico*, debido a que se realiza una análisis de las variables que emite el cuestionario diseñado mediante el protocolo NASA TLX y correlacional donde se comprueba si existe relación entre las variables de las hipótesis.

### 3.3 Definición de variables

El proceso de reconocimiento de variables incluye tanto la conceptualización de términos de acuerdo con la literatura como la definición operacional proyectada en un cuadro de definición de variables, mismo que dará estructura a la investigación, distribuido en: variables dependientes, independientes y complementarias. Sirva lo anterior para dar pie a la clasificación y definición de variables. Ver apéndice “B”

- Variable Dependiente. Sub-escalas de protocolo NASA TLX.
- Variable Independiente. Medio ambiente.
- Variables complementarias. Información demográfica y biológica.

### 3.4 Criterios de selección

Entre los criterios que se han propuesto para integrar o no permitir el acceso a las personas que desean participar en el estudio, se anotan los siguientes.

#### Inclusión

Se consideran dentro de la muestra de estudio los participantes que cumplan los siguientes requisitos:

- Alumnos, adscrito al Instituto de Ciencias de la Salud que desee participar en el proyecto.
- Alumnos, de los siguientes turnos: matutino y vespertino.
- Alumnos, de las Áreas Académicas de Enfermería, Medicina y Odontología.
- Alumnos que manifiesten su deseo de participación, regulares, con disponibilidad de tiempo con la finalidad de que la actividad a desarrollar no interfiera con el horario de clases.





### **Exclusión**

Se consideran fuera de la muestra, y por lo tanto no podrán participar en el estudio, aquellas personas que cumplan las siguientes características:

- Alumnos de áreas diferentes del Instituto de Ciencias de la Salud.
- Alumnos de salud, que aun cumpliendo con los criterios de inclusión, no desee participar en el proyecto.
- Alumnos que este de vacaciones, o tengan alguna incidencia administrativa.

### **Eliminación**

Se eliminarán los datos referentes a los participantes con las siguientes características:

- Alumnos que hayan aceptado participar en el estudio, no concluyen el llenado de la encuesta.
- Alumnos del área de salud que, una vez iniciado el proceso, ya no desee participar en el estudio.
- Alumnos del área de salud que, una vez iniciado el proceso, no haya firmado el consentimiento informado.

## **3.5 Instrumento de recolección de datos**

Para realizar este estudio se diseñó un instrumento para la recolección de datos (encuesta) para realizar la evaluación de un sistema de interacción física Hombre-Robot con base en el protocolo NASA TLX; como se muestra en el Apéndice C.

Este instrumento consta de los siguientes 4 apartados: Datos biológicos, Datos generales, Protocolo NASA TLX y Ambientales.

Los datos biológicos se registrarán una vez que el personal de apoyo de enfermería realice la actividad para tomar peso, presión arterial, ritmo cardiaco y temperatura corporal de los participantes en este estudio.

Los datos generales, son registrados por cada participante en el estudio; así como los ítems del NASA TLX, los cuales se basan en la aplicación del “Development of NASA-TLX (Task Load Index); Results of Empirical and Theoretical Research” que realizó Sandra G. Hart.



Como se ha mencionado antes, el NASA TLX cuenta con una puntuación de 5 a 100 con escalas de 5 puntos cada uno, como se muestra en la Tabla 3.1.

**Tabla No. 3.1** Indicadores del protocolo NASA TLX

Sub-escala	Puntos	Significado
Demanda Mental	5 al 100	5= No 50 = 0 100= Si
Demanda Física	5 al 100	5= No 50 = 0 100= Si
Demanda Temporal	5 al 100	5= No 50 = 0 100= Si
Esfuerzo	5 al 100	5= No 50 = 0 100= Si
Frustración	5 al 100	5= No 50 = 0 100= Si
Rendimiento	5 al 100	5= Si 50 = 0 100=No

Fuente: Interpretación Rosario Barrera-Gálvez & Omar Domínguez-Ramírez 2014.

El medio ambiente se registró a partir de la aplicación que se diseñó en el Laboratorio de Háptica Avanzada [38].

Los datos obtenidos de este instrumento se tabulan y se realiza el proceso de evaluación conforme a las aplicaciones ya diseñadas para ello.

Cabe destacar que antes de realizar el estudio se tomó una muestra piloto de 100 participantes para validar el diseño del instrumento.

### 3.6 Plan de recolección de los datos

Procedimiento para la recolección de la información: los participantes se seleccionaron de manera aleatoria, se instalan en una área física predeterminada (CLEMPS del ICSa), se inicia con una breve capacitación sobre la tarea de navegación con guiado kinestésico, en la fase de reconocimiento la actividad de alumno participante, se realiza la tarea de navegación de guiado kinestésico en la fase de capacitación, activo y pasivo y su intervención tiene en promedio una duración de 12 minutos en la aplicación de la tarea con los dispositivos hápticos y 5 minutos en la toma de signos vitales y 5 minutos más para finalizar esta actividad contesta el cuestionario diseñado a través del protocolo NASA TLX.

### 3.7 Recursos para llevar a cabo la investigación

Requerimientos para llevar a cabo la investigación prospectiva:

1. La participación de personas:

- 248 Encuestados.
- Se contó con alumnos de 3 áreas académicas del ICSa, (Medicina, Enfermería y Odontología) que aceptaron participar en el estudio a través de una tarea de navegación en un ambiente virtual dinámico tridimensional.
- Se contó con el apoyo de 2 enfermeras que se encargaron de medir los signos vitales de los participantes antes de realizar la actividad y después de realizarla.

2. Un espacio físico.

- Un salón de simulación del CLEMPs del ICSa, donde se capacita a un grupo de 40 personas sobre el proceso a desarrollar duró solo 10 minutos.
- En este espacio instaló el equipo que consta de 2 computadoras, 2 dispositivo háptico Pahantom Omni y un equipo para medir las condiciones del medio ambiente (temperatura, humedad, iluminación y ruido). Ver la Figura No. 3.3 Espacio físico donde se llevó a cabo la investigación

3. Personal de enfermería

- 2 estudiantes de enfermería, con la finalidad de que puedan tomar los signos vitales a los participantes antes y después del estudio.
- Las acciones fueron:
  - Pesar en una báscula al participante.
  - Tomarles la presión con dos baumanómetros.
  - Tomarles la temperatura, con dos termómetros (consumibles algodón y alcohol)
  - Medirles la frecuencia cardiaca a través del pulso del participante.
  - Anotar los datos en la encuesta y en el volante que se entrega a los participantes.



### Imagen No. 3.3 Espacio físico donde se tomaron los signos vitales



Fuente: Fotos realizadas en el momento de la investigación Marzo 2014.

#### 4. Materiales para la aplicación del instrumento

- 248 Encuestas en base al protocolo NASA TLX.
- 248 Consentimiento informado.
- 248 Volantes que contiene el consentimiento informado y se anotarán los datos de los signos vitales de los participantes.
- Lapiceros de tinta negra.
- Una presentación informativa.
- Video proyector.
- Lap top.

#### 5. Responsables del proyecto.

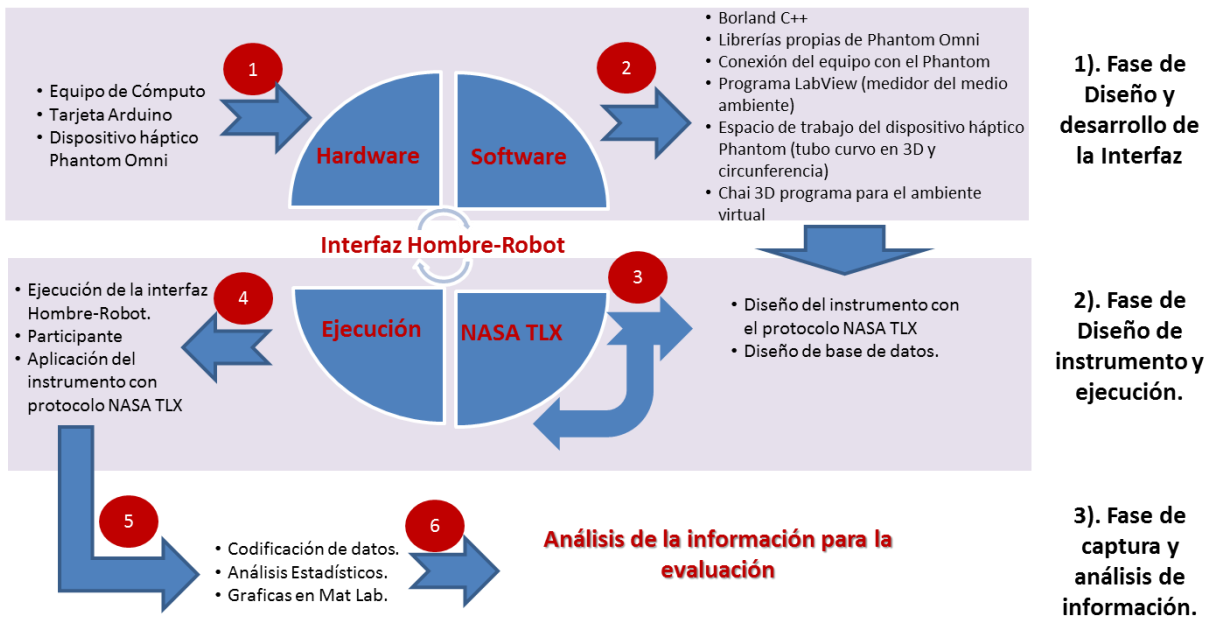
- Se dio de dar la bienvenida al grupo y realizó una breve explicación de que consiste su participación.
- Dos personas controlaron el equipo de cómputo y grabaron los archivos generados.
- Una persona, al finalizar la actividad, aplicó el cuestionario.
- El personal de apoyo de enfermería tomó los signos vitales y anotó en cada encuesta y volantes que se le entregará al participante.

### 3.8 Metodología de la investigación

La realización de un proyecto de investigación que permita efectuar la combinación de una interfaz Hombre-Robot y los datos que se obtienen sólo son guardados en el equipo de cómputo para posteriormente realizar una análisis de estos datos, que son fuerza, colisión, velocidad y trayectoria; estos datos dan un modelo que se ejecuta solamente con el Robot y el Hombre, pero no permite medir el comportamiento del ser humano ante la realización de una tarea de guiado háptico. Para realizar esa evaluación de cómo el ser humano se sintió en la ejecución de la tarea se puede captar a través del diseño de preguntas con el protocolo NASA TLX.

Para esta investigación se diseñó un método que permite identificar cada uno de los pasos a seguir de manera general desde la construcción de la interfaz Hombre-Robot; el diseño del instrumento con base al protocolo NASA TLX y finalmente el análisis de los datos para evaluar el comportamiento del ser humano ante la realización de la tarea del guiado háptico.

**Imagen No. 3.4** Metodología para la evaluación de un Sistema de Interacción Física Hombre-Robot.



**Fuente:** Modelo de la evaluación de una interfaz Hombre-Robot basada en el protocolo NASA TLX; Elaboración propia Barrera-Gálvez, R. 2014

Como se puede observar la “Metodología para la evaluación de un Sistema de Interacción Física Hombre-Robot basada en el protocolo NASA TLX” cuenta con 3 fases:

1. Diseño y desarrollo de la interfaz.
2. Diseño del instrumento y ejecución.
3. Captura y análisis de información.

Los cuales se explican a continuación:

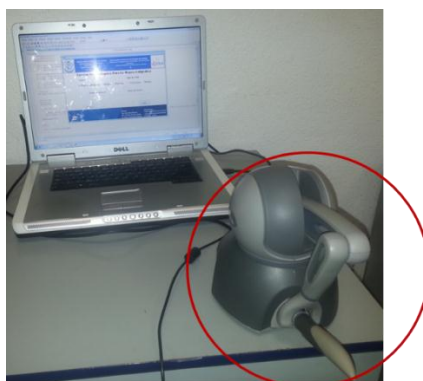
### **1. Diseño y desarrollo de la interfaz.**

Al iniciar esta fase es importante contar con información bibliográfica de diferentes proyectos que se hayan desarrollado con fines de efectuar una interfaz Hombre-Robot ya sean para rehabilitación o investigaciones con tareas de guiado háptico de laberintos o de caligrafía.

Una vez que se cuente con información y el conocimiento necesario se realiza el planteamiento de la nueva investigación como es en este caso el desarrollo de una interfaz Hombre-Robot para la caligrafía, que en un futuro puede servir para realizar neurorehabilitación en pacientes con discapacidad de miembros superiores.

El desarrollo de esta fase es completamente computacional y electrónica ya que se deben codificar programas en diferentes lenguajes de programación y realizar la conexión con el Phantom Omni.

**Imagen No. 3.5** Phantom Omni y la conexión de la plataforma computacional.



**Fuente:** Fotos tomas en el momento de la investigación Marzo 2014.

En la Imagen No. 3.5 Phantom Omni y la conexión de la plataforma computacional; se visualiza el Phantom Omni y la conexión con la plataforma computacional que contiene la planificación de la trayectoria; Unidad de procesamiento y comunicación; además, de la Interfaz háptica donde el participante tendrá la visualización en realidad virtual den 3D y los niveles de control; finalmente la tarea a realizar que es el estímulo real y estímulo virtual y esto lleva a la estimulación visual del participante y acción motriz.

## **2. Diseño del instrumento y ejecución.**

En esta fase, al igual que en la anterior, se debe revisar la bibliografía existente sobre el protocolo NASA Task Load Index (NASA-TLX), con la finalidad de entender su usabilidad debido a que es una herramienta de evaluación subjetiva y multidimensional que las tasas de carga de trabajo percibida, con el fin de evaluar una tarea, el sistema o la eficacia del equipo o de otros aspectos del rendimiento y así poder construir un instrumento que permita medir sus seis sub-escalas (Demanda Mental; Demanda Física; Demanda Temporal; Rendimiento; Esfuerzo y Frustración) como se muestra en el apartado 2.3.4 “El protocolo NASA TLX”.

El NASA TLX está conformado de dos partes, una es el diseño del cuestionario que capta los datos demográficos del participante y la segunda parte es la ponderación de cada respuesta del instrumento. Una vez realizada la carga de trabajo en los dispositivos hápticos y con la valoración de cada participante se realizó la evaluación de manera subjetiva y multidimensional en la carga de trabajo percibida en la ejecución, como se muestra en el Apéndice B “Definición de variables” y el Apéndice C “Encuesta para la Evaluación de una interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX”.

Finalmente en la ejecución de este estudio se consideran las siguientes actividades, que permitieron llevar a cabo los usuarios a través de la tarea de navegación con guiado kinestésico local para un miembro superior:

1. Capacitación y medición del tiempo utilizado por el usuario.
2. Entorno virtual háptico activo, el usuario controla el dispositivo Phanthom Omni.
3. En el entorno virtual háptico pasivo, el usuario realiza el guiado háptico a través de las funciones que realiza el dispositivo Phanthom Omni.



4. El usuario realiza la actividad virtual háptico activo, el usuario controla el dispositivo Phanthom Omni.
5. El Usuario contesta la encuesta de “Evaluación de una Interfaz Hombre - Robot con Base en el Protocolo NASA TLX”.

### 3. Captura y análisis de la información

Para la realización de esta fase se diseñó la plataforma y la base de datos que sirvió para la captura de los datos obtenidos una vez realizada la investigación. Posteriormente, se efectúa la codificación del instrumento, captura de los datos y finalmente realizar un análisis estadístico; como se muestra en el siguiente capítulo 4 Plataforma HRpl para evaluación de habilidades motoras en miembro superior.

#### 3.9 Ética del estudio

Ya que se trata de un estudio observacional transversal en el que se obtuvieron datos estadísticos en una sola toma, se presentaron las variables para la obtención de la información; la investigación fue participativa; se mantuvo una interacción con los participantes del estudio, por lo que se considera una investigación sin riesgo, ya el Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la Salud [39], Título Segundo "De los Aspectos Éticos de la Investigación en Seres Humanos", Capítulo I, contiene los siguientes artículos:

ARTÍCULO 13.-En toda investigación en la que el ser humano sea sujeto de estudio, deberá prevalecer el criterio del respeto a su dignidad y la protección de sus derechos y bienestar.

ARTÍCULO 15.- Cuando el diseño experimental de una investigación que se realice en seres humanos incluya varios grupos, se usarán métodos aleatorios de selección para obtener una asignación imparcial de los participantes en cada grupo y deberán tomarse las medidas pertinentes para evitar cualquier riesgo o daño a los sujetos de investigación.

ARTÍCULO 16.- En las investigaciones en seres humanos se protegerá la privacidad del individuo sujeto de investigación, identificándolo sólo cuando los





resultados lo requieran y éste lo autorice. Ver apéndice D. “Consentimiento informado”.

ARTÍCULO 17.- Se considera como riesgo de la investigación a la probabilidad de que el sujeto de investigación sufra algún daño como consecuencia inmediata o tardía del estudio. Para efectos de este Reglamento que se encuentra en la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la Salud, las investigaciones se clasifican en las siguientes categorías;

- I. Investigación sin riesgo: Son estudios que emplean técnicas y métodos de investigación documental retrospectivos y aquéllos en los que no se realiza ninguna intervención o modificación intencionada en las variables fisiológicas, psicológicas y sociales de los individuos que participan en el estudio, entre los que se consideran: cuestionarios, entrevistas, revisión de expedientes clínicos y otros, en los que no se le identifique ni se traten aspectos sensitivos de su conducta;
- II. Investigación con riesgo mínimo: Estudios prospectivos que emplean el riesgo de datos a través de procedimientos comunes en exámenes físicos o psicológicos de diagnósticos o tratamiento rutinarios, entre los que se consideran: pesar al sujeto, pruebas de agudeza auditiva; electrocardiograma, termografía, colección de excretas y secreciones externas, obtención de placenta durante el parto, colección de líquido amniótico al romperse las membranas, obtención de saliva, dientes deciduales y dientes permanentes extraídos por indicación terapéutica, placa dental y cálculos removidos por procedimiento profilácticos no invasores, corte de pelo y uñas sin causar desfiguración, extracción de sangre por punción venosa en adultos en buen estado de salud, con frecuencia máxima de dos veces a la semana y volumen máximo de 450 Ml. en dos meses, excepto durante el embarazo, ejercicio moderado en voluntarios sanos, pruebas psicológicas a individuos o grupos en los que no se manipulará la conducta del sujeto, investigación con medicamentos de uso común, amplio margen terapéutico, autorizados para su venta, empleando las indicaciones, dosis y vías de administración establecidas y que no sean los medicamentos de investigación que se definen en el artículo 65 de este Reglamento, entre otros, y
- III. Investigación con riesgo mayor que el mínimo: Son aquéllas en que las probabilidades de afectar al sujeto son significativas, entre las que se consideran: estudios radiológicos y con microondas, ensayos con los



medicamentos y modalidades que se definen en el artículo 65 de este Reglamento, ensayos con nuevos dispositivos, estudios que incluyan procedimientos quirúrgicos, extracción de sangre 2% del volumen circulante en neonatos, amniocentesis y otras técnicas invasoras o procedimientos mayores, los que empleen métodos aleatorios de asignación a esquemas terapéuticos y los que tengan control con placebos, entre otros.

ARTÍCULO 18.- El investigador principal suspenderá la investigación de inmediato, al advertir algún riesgo o daño a la salud del sujeto en quien se realice la investigación. Asimismo, será suspendida de inmediato cuando el sujeto de investigación así lo manifieste.

ARTÍCULO 19.- Es responsabilidad de la institución de atención a la salud proporcionar atención médica al sujeto que sufra algún daño, si estuviere relacionado directamente con la investigación, sin perjuicio de la indemnización que legalmente corresponda.

ARTÍCULO 20.- Se entiende por consentimiento informado el acuerdo por escrito, mediante el cual el sujeto de investigación o, en su caso, su representante legal autoriza su participación en la investigación, con pleno conocimiento de la naturaleza de los procedimientos y riesgos a los que se someterá, con la capacidad de libre elección y sin coacción alguna.

Dentro de la investigación prevalecerá el criterio de respeto a la dignidad del participante y la protección de sus derechos y bienestar. Se da primordial importancia a la confidencialidad de los datos y no se incide en ningún momento en el pensamiento o la conducta de los participantes como lo describe el artículo 16. Además se solicita a los participantes que firmen una hoja de consentimiento informado Artículo No. 20 (Ver Apéndice D: "Consentimiento Informado").



# Capítulo 4

Plataforma HRpI para evaluación de  
habilidades motoras en miembro superior



En este capítulo se tomó como referencia la “Metodología para evaluar un sistema de interacción física Hombre-Robot” que se describe en el *apartado 3.8 Metodología de la Investigación*; en particular su Fase 1, Diseño y desarrollo de la Interfaz que permitió ordenar las ideas y realizar la estructura de la plataforma a utilizar en la investigación.

Esta fase consta de 2 elementos: el Software y el Hardware; que permitieron desarrollar la plataforma HRpl para evaluación de habilidades motoras en miembro superior, los cuales se describen a continuación:

### **Software**

- Borland C++
- Librerías propias de Phantom Omni
- Conexión del equipo con el Phantom
- Programa LabView (medidor del medio ambiente)
- Espacio de trabajo del dispositivo háptico Phantom (hipertubo en 3D y circunferencia)
- Chai 3D programa para el ambiente virtual

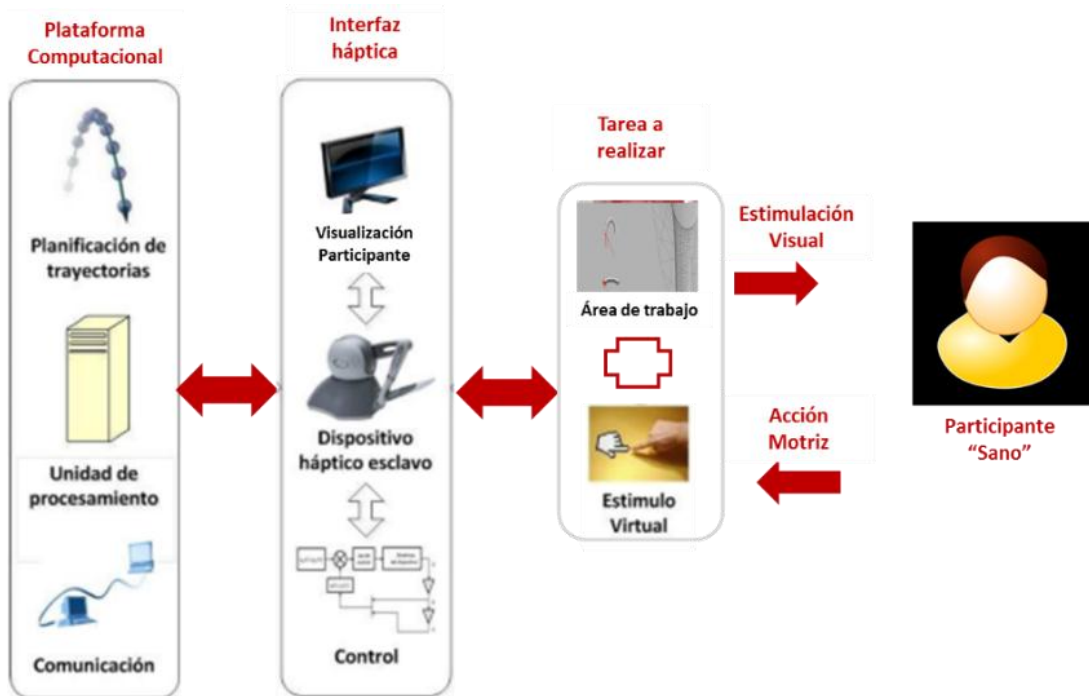
### **Hardware**

- Equipo de Cómputo
- Tarjeta Arduino
- Dispositivo háptico Phantom Omni

La configuración del guiado háptico se encuentra en tres bloques plataforma computacional, interfaz háptica y el bloque de la tarea a realizar, como se muestra en la Figura 4.1:



Figura No.4.1 Configuración del guiado háptico



Fuente: Laboratorio de Robótica Avanzada e Interfaces Hápticas. UAEH-ICBI-CITIS.

El guiado háptico se considera como una técnica común para enseñar a las personas (que tienen una incapacidad con sus miembros superiores) a través de un movimiento deseado durante un proceso de entrenamiento, es decir, un operador humano puede aprender a localizar un nuevo camino después de haber practicado el guiado háptico por medio del uso de un robot. La técnica de guiado háptico consiste en un camino virtual, el cual guía el movimiento de la mano a seguir una trayectoria.

Existe un gran paradigma que se basa en el entrenamiento que se ha explorado hasta el momento en el seguimiento de trayectorias por medio de guiado háptico, es decir, un dispositivo robótico físicamente guía extremidades del operador a través de una trayectoria deseada<sup>13</sup> particularmente en el proyecto de **“Neurorrehabilitación robótica basada en guiado kinestésico local para miembro superior con movimiento involuntario”** [11]. Sin embargo, hasta el momento no se ha evaluado el guiado háptico desde la perspectiva del operador, y es aquí donde

<sup>13</sup> Investigación realizada en la UAEH, a través del Laboratorio de Robótica Avanzada e Interfaces Hápticas. UAEH-ICBI-CITIS que dirige el D. C. Omar A. Domínguez Ramírez.

nos encontramos que si bien el guiado háptico se traduce en una mayor eficiencia en el desarrollo de la tarea, también modifica la carga de trabajo en el operador, la cual según la hipótesis que se plantea se condiciona a la energía total demandada y la carga de trabajo del usuario, así como el nivel de estrés del usuario en la tarea de navegación con guiado kinestésico con el dispositivo háptico Phantom Omni a través del protocolo NASA TLX.

Siguiendo el esquema de guiado kinestésico local empleando una plataforma robótica, que tiene como finalidad entrenar a un operador humano, cabe mencionar que este tipo de plataformas también ha sido implementado en la rehabilitación de miembro superior, con base en el principio de la neuroplasticidad, el cual propone que la memoria kinestésica del humano tiene la habilidad de recordar con exactitud la posición y velocidad de una tarea de seguimiento, a través de la retroalimentación o biofeedback. Es por esto que el guiado háptico pasivo es una alternativa para la capacitación de los operadores que deban realizar tareas de seguimiento, ya que a través de la repetición constante de la trayectoria el operador será capaz de realizar cada vez mejor la tarea.

#### **4.1 Diseño de la plataforma HRpl.**

Para la evaluación de un sistema de interacción física Hombre-Robot a través del protocolo NASA TLX, se consideraron los siguientes puntos:

1. Se diseñó una arquitectura abierta del dispositivo háptico, obtención de modelos matemáticos, evaluación de estrategias de control no lineal y control inteligente, y planificación de movimiento. Laboratorio de Robótica y Háptica [38].
2. Diseño y desarrollo de un ambiente virtual para entrenamiento, y otra para evaluación experimental, para retroalimentación kinestésica (interfaz háptica activa). Laboratorio de Robótica y Háptica [38].
3. Diseño y desarrollo de la tarea de seguimiento asistido o guiado háptico pasivo sobre una geometría peabody 2. Laboratorio de Robótica y Háptica [38].
4. Evaluación de desempeño de energía y convergencia en cada caso (puntos 2 y 3). Laboratorio de Robótica y Háptica [38].



5. Diseño de la estrategia de evaluación NASA TLX (task load index) para medir el índice de carga de trabajo relativa al usuario, y particularmente para la aplicación.
6. Estación de instrumentación ambiental: ruido, iluminación, temperatura y humedad relativa con labview y matlab simulink con tool box de tiempo real. Laboratorio de Robótica y Háptica [38].
7. Medición de signos vitales: temperatura corporal, presión arterial y ritmo cardiaco de cada usuario.
8. Estrategia de evaluación en 200 +/- usuarios de ICESA.
9. Análisis de resultados.

El propósito es: proponer una plataforma para navegación virtual y guiado kinestésico con perspectivas de entrenamiento, entretenimiento, simulación, terapia física entre otras. Para ello, es indispensable verificar el desempeño de la interfaz, desde el punto de vista del robot (variables inherentes al estado del dispositivo: hamiltoniano, convergencia del error de posición y velocidad operacional, manipulabilidad cinemática y dinámica, robustez y estabilidad práctica); y también verificar el desempeño desde el punto de vista del usuario (Protocolo NASA TLX: esfuerzo, estrés, fatiga, frustración y demandas temporal, física y mental).

En los diversos sistemas de interacción humano-máquina, la usabilidad y utilidad son empleadas cuando la interacción no es física; también es posible verificar el desempeño a través del protocolo NASA TLX (exclusiva o establecida para ese propósito específico). Esto no es suficiente cuando la interacción es física. Es el caso de este trabajo, muchos de los resultados permiten verificar el cruce o correspondencia entre señales físicas del robot y los indicadores del protocolo NASA TLX, de tal modo que esta última gana objetividad en la evaluación del sistema de interacción física Hombre-Robot.

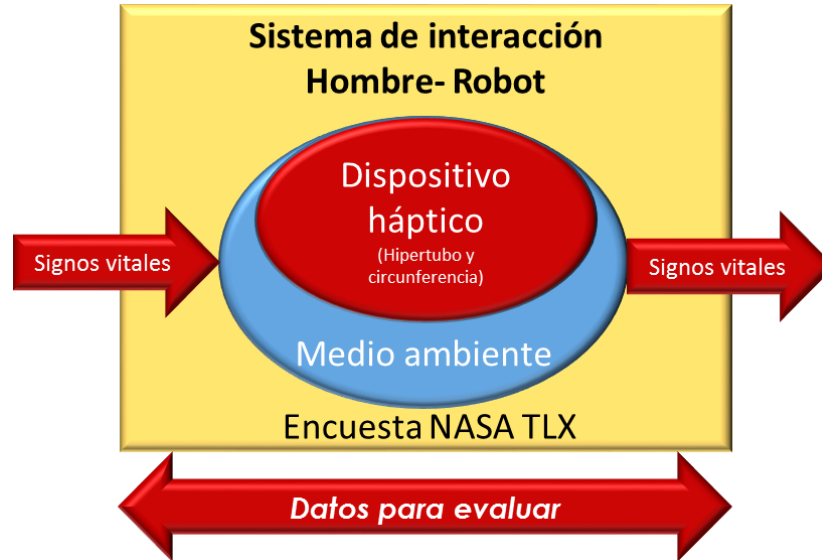
Para poder llegar a esto deben recrearse todos los elementos descritos en los puntos 1 a 9. La medición de parámetros ambientales y signos vitales tiene por objetivo el discriminar lecturas falsas de usuarios cuyo bajo desempeño este dado por un esfuerzo motivado por ambiente extremo o incomodo, y condiciones de enfermedad en el usuario.



#### 4.1.1 Plataforma para un sistema de interacción Hombre-Robot (HRpl)

La Figura 4.2 muestra el diagrama de la estructura que tiene el sistema de interacción física Hombre-Robot que servirá como base para ser evaluado mediante la aplicación de una encuesta diseñada con el protocolo NASA TLX.

**Figura No. 4.2** Diseño de la plataforma Sistema de Interacción Física Hombre-Robot (HRpl)



Fuente: Diseño de Rosario Barrera-Gálvez & Omar Domínguez-Ramírez, 2014

El sistema de interacción cuenta con un dispositivo háptico, medio ambiente, NASA TLX y signos vitales; donde:

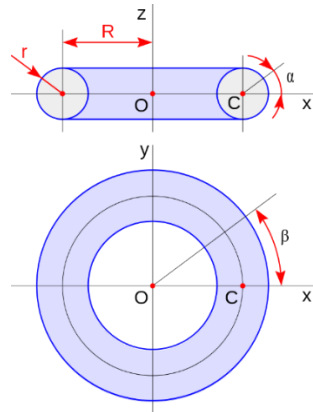
- El medio ambiente, mide el cambio de temperatura en el ambiente, un sonido o un sonido estridente, la humedad del ambiente y el cambio en la iluminación.
- Los signos vitales, se toman por profesionales del Área de Enfermería y se captan los datos de cada persona participante antes de iniciar la carga de trabajo y al terminar la actividad, datos que se captan: peso; temperatura corporal; presión arterial y frecuencia cardíaca.
- NASA TLX, mide como se sintió la persona, en la realización de la carga de trabajo.
- El dispositivo háptico, mide el esfuerzo que se generó en la realización de la tarea (hipertubo y circunferencia)



- **Hipertubo**

El diseño de un hipertubo nace a través de la definición de un “toroide” que es una figura geométrica en revolución (que gira), generada por una curva plana cerrada que gira alrededor de una recta exterior coplanaria (el eje de rotación situado en su mismo plano) con la que no se interseca<sup>14</sup>, esta puede ser comparada con la forma de una dona o un anillo. Figura 4.3 se puede observar cómo se seccionó para nuestro caso de estudio.

**Figura No. 4.3** Representación de un toroide seccionado.



**Fuente:** Toroide, generado por un círculo.

**Expresión matemática.**

Las coordenadas de un punto cualquiera del toro se obtienen mediante las siguientes expresiones, donde  $\alpha$  es la latitud del punto respecto del plano xz, y  $\beta$  el ángulo de rotación de la circunferencia generatriz alrededor del eje z o longitud. Como se muestra en la Ecuación 4.1:

**Ecuación No. 4.1** Expresión matemática de un toroide

$$\begin{aligned}
 x &= (R + r \cos \alpha) \cos \beta \\
 y &= (R + r \cos \alpha) \sin \beta \\
 z &= r \sin \alpha
 \end{aligned}$$

<sup>14</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Toroide>.

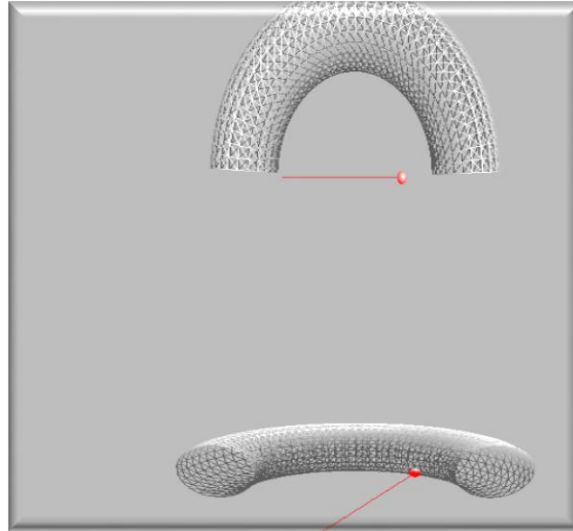
A cualquier par de valores de los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  le corresponde un punto del toroide. Partiendo de la ecuación 4.2:

**Ecuación No. 4.2** Valor de ángulos  $\alpha$  y  $\beta$

$$\left. \begin{aligned} x &= (R + r \cos \alpha) \cos \beta \\ y &= (R + r \cos \alpha) \sin \beta \\ \sin^2 \beta + \cos^2 \beta &= 1 \end{aligned} \right\} x^2 + y^2 = (R + r \cos \alpha)^2$$

Para esta investigación se desarrolló un programa en C++ en el cual se determina la sección que será utilizada con el dispositivo háptico al cual se le denominó hipertubo; en Laboratorio de Robótica Avanzada [38] Como se muestra en la Figura 4.4.

**Figura No. 4.4** Espacio de trabajo del hipertubo.



**Fuente:** Programación en C++ del espacio de trabajo; Chai y la conexión al dispositivo háptico Phantom Omni; Laboratorio de Robótica Avanzada e Interfaces Hápticas. UAEH-ICBI-CITIS.

Los datos generados se guardan en un archivo.txt, con la siguiente estructura:

**Tabla 4.1** Datos.txt Hipertubo

No.	Nombre de campo	Descripción	Tipo
1	Columna1	Tiempo	Integral

No.	Nombre de campo	Descripción	Tipo
2	Columna2	Posición articulación 1	Integral
3	Columna3	Posición articulación 2	Integral
4	Columna4	Posición articulación 3	Integral
5	Columna5	Velocidad articulación 1	Integral
6	Columna6	Velocidad articulación 2	Integral
7	Columna7	Velocidad articulación 3	Integral
8	Columna8	Colisión (indica 1 si colisiona o 0 si no colisiona)	Entero

- **Circunferencia**

Con la finalidad de visualizar el estudio de la geometría utilizada en la trayectoria trazada por el dispositivo háptico, es necesario entrar en el tema de la cinemática del dispositivo, dado que a partir de la consigna deseada se realiza la tarea.

La cinemática es la rama de la Física que estudia las leyes del movimiento de los cuerpos sin considerar las causas que lo originan (las fuerzas) y se limita, esencialmente, al estudio de la trayectoria en función del tiempo. La aceleración es el ritmo con el que cambia la velocidad. La velocidad y la aceleración son las dos principales magnitudes que describen cómo cambia la posición en función del tiempo.

*El movimiento circular uniforme* se caracteriza por tener una velocidad variable o estructural constante por lo que la aceleración angular es nula. La velocidad lineal de la partícula no varía en módulo, pero sí en dirección. La aceleración tangencial es nula; pero existe aceleración centrípeta (la aceleración normal), que es causante del cambio de dirección.

Matemáticamente, la velocidad angular se expresa como:

$$\omega = \omega_0 = \text{const.}$$

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

Donde  $\omega$  es la velocidad angular (constante),  $\Delta\varphi$  es la variación del ángulo barrido por la partícula y  $\Delta t$  es la variación del tiempo.

El ángulo recorrido en un intervalo de tiempo es:

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t$$

Para la realización de la tarea de guiado háptico del dispositivo se presenta el análisis matemático de la cinemática. La cinemática directa de posición permite conocer el desempeño del robot en el espacio de trabajo. Modelo cinemático de posición [40].

**Ecuación No. 4.3** Modelo cinemático de posición

$$\begin{aligned} X &= S_1(L_1C_2 + L_2C_3) \\ Y &= L_0 - L_2C_3 + L_1S_2 \\ Z &= C_1(L_1C_2 + L_2C_3) \end{aligned}$$

El modelo cinemático inverso de posición consiste en la expresión de los ángulos  $q_i$  de cada articulación en función de la posición del efector final, en coordenadas cartesianas.

**Ecuación No. 4.4** Modelo cinemático inverso

$$\begin{aligned} q_1 &= a \tan\left(\frac{x}{z}\right) \\ q_2 &= a \tan\left(\frac{y - L_0}{\sqrt{x_1^2 + z_1^2}}\right) \\ q_3 &= a \tan\left(\frac{\sqrt{x^2 + z^2} - r}{y - L_0}\right) \\ \text{donde } r &= \sqrt{x_1^2 + z_1^2} \end{aligned}$$

El modelo cinemático de velocidad relaciona a la velocidad articular en términos de la velocidad operacional y viceversa, y corresponde a la derivada temporal del modelo cinemático de posición y que de esta manera se genera la matriz Jacobiana modelo cinemático de velocidad. Ver Ecuación 4.4 Modelo cinemático de velocidad.



**Ecuación No. 4.5** Modelo cinemático de velocidad

$$J = \begin{bmatrix} L1C_1C_2 + L2S_3C_1 & -L1S_1S_2 & L2S_1C_3 \\ 0 & L1C_2 & L2S_3 \\ -L1S_1C_2 + L2S_1S_3 & L1S_2C_1 & L2C_1C_3 \end{bmatrix}$$

Modelo cinemático inverso de velocidad. El modelo cinemático inverso de velocidad de PHANToM 1.0 está definido por  $q = J^{-1} * \dot{x}$ , donde  $J^{-1}$  es la matriz inversa de la matriz Jacobiana.

Este modelo permite el mapeo de las aceleraciones articulares a las operacionales, y es definido a partir de la derivada temporal de  $\dot{x} = Jq$  Modelo cinemático de aceleración. Ver Ecuación 4.5 Modelo cinemático de aceleración.

**Ecuación No. 4.6** Modelo cinemático de aceleración

$$\begin{matrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{matrix}$$

$$J_{11} = l_1 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) + l_2 \sin(\theta_2) * \cos(\theta_1)$$

$$J_{12} = -l_1 \sin(\theta_1) \sin(\theta_2)$$

$$J_{13} = l_2 \sin(\theta_1) \cos(\theta_3)$$

$$J_{21} = 0$$

$$J_{22} = l_1 \cos(\theta_2);$$

$$J_{23} = l_2 * \sin(\theta_3);$$

$$J_{31} = -l_1 \sin(\theta_1) \cos(\theta_3) - l_2 \sin(\theta_1) * \sin(\theta_3);$$

$$J_{32} = -l_1 * \sin(\theta_2) * \cos(\theta_1);$$

$$J_{33} = l_2 \cos(\theta_1) \cos(\theta_3);$$



- El modelo cinemático de aceleración: Este modelo permite el mapeo de las aceleraciones articulares a las operacionales.
- El modelo cinemático inverso de aceleración: es el conjunto de ecuaciones que permite conocer la aceleración articular en términos de la aceleración operacional y de la velocidad articular.

### Modelo cinemático inverso de posición.

Se codificó mediante el programa de Borland C++ donde la posición real es denotada para el caso cartesiano por X, Y, Z y la velocidad  $\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$  mientras que para el caso articular por  $q_1, q_2, q_3$ , la velocidad se denota como  $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3$ ; para el caso de la posición y velocidad solo se añade una “d”.

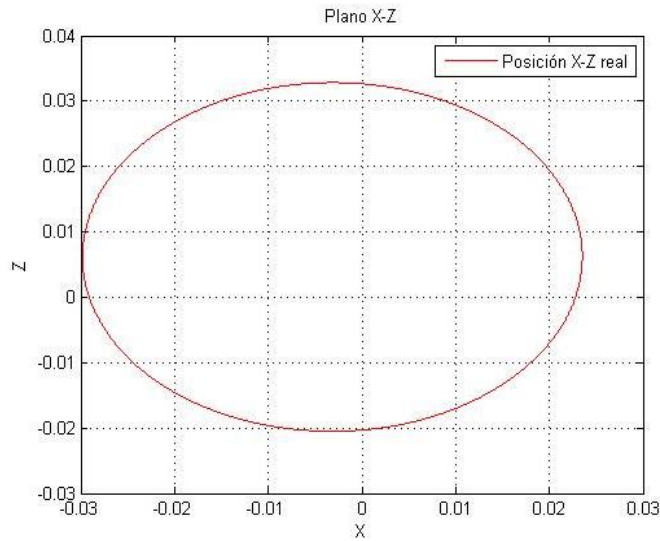
Estos datos son de la circunferencia, W es frecuencia, h1 y h2 es el desplazamiento en el espacio en x y z.

### Ecuación No. 4.7 Paramétrica de la circunferencia

```
w=pi/2,radio = 0.025,h1=0,h2=0;//-0.018861,h2=0.01522;
X= h1+radio*cos(w*t);
Y= 0.0;
Z = h2+radio*sin(w*t);// Posición cartesiana deseada
VeldX = -radio*w*sin(w*t);
VeldY = 0;
VeldZ = radio*w*cos(w*t);//velocidad deseada
acedX = -radio*pow(w,2)*cos(w*t);
acedY = 0;
acedZ = -radio*pow(w,2)*sin(w*t); // Aceleración cartesiana deseada
```

En el caso de la aceleración no la usamos en las gráficas ya que el dispositivo háptico no entrega retroalimentación de velocidad.

**Gráfica No. 4.5** Desempeño en el espacio de trabajo



**Fuente:** MatLab programación del espacio de trabajo Laboratorio de Robótica Avanzada e Interfaces Hápticas. UAEH-ICBI-CITIS.

Los datos generados se guardan en un archivo.txt, con la siguiente estructura en la Tabla 4.2 y 4.3:

**Tabla No. 4.2** Datos.txt para tarea de guiado háptico en activo

No.	Nombre de campo	Descripción	Tipo
1	Columna1	Tiempo	Integral
2	Columna2	Posición cartesiana 1	Integral
3	Columna3	Posición cartesiana 2	Integral
4	Columna4	Posición cartesiana 3	Integral
5	Columna5	Posición deseada 1	Integral
6	Columna6	Posición deseada 2	Integral
7	Columna7	Posición deseada 3	Integral
8	Columna8	Parámetro 1	Integral
9	Columna9	Parámetro 2	Integral
10	Columna10	Parámetro 3	Integral
11	Columna11	Parámetro 4	Integral
12	Columna12	Parámetro 5	Integral
13	Columna13	Parámetro 6	Integral
14	Columna14	Parámetro 7	Integral
15	Columna15	Parámetro 8	Integral
16	Columna16	Parámetro 9	Integral
17	Columna17	Parámetro 10	Integral
18	Columna18	Señal de control 1	Integral

No.	Nombre de campo	Descripción	Tipo
19	Columna19	Señal de control 2	Integral
20	Columna20	Señal de control 3	Integral

**Tabla No. 4.3** Datos.txt para tarea de guiado háptico en pasivo

No.	Nombre de campo	Descripción	Tipo
1	Columna1	Error de posición 1	Integral
2	Columna2	Error de posición 2	Integral
3	Columna3	Error de posición 3	Integral
4	Columna4	Error de velocidad 1	Integral
5	Columna5	Error de velocidad 2	Integral
6	Columna6	Error de velocidad 3	Integral
7	Columna7	Señal de control real 1	Integral
8	Columna8	Señal de control real 2	Integral
9	Columna9	Señal de control real 3	Integral
10	Columna10	Fuerza 1	Integral
11	Columna11	Fuerza 2	Integral
12	Columna12	Fuerza 3	Integral
13	Columna13	Posición articular 1	Integral
14	Columna14	Posición articular 2	Integral
15	Columna15	Posición articular 3	Integral

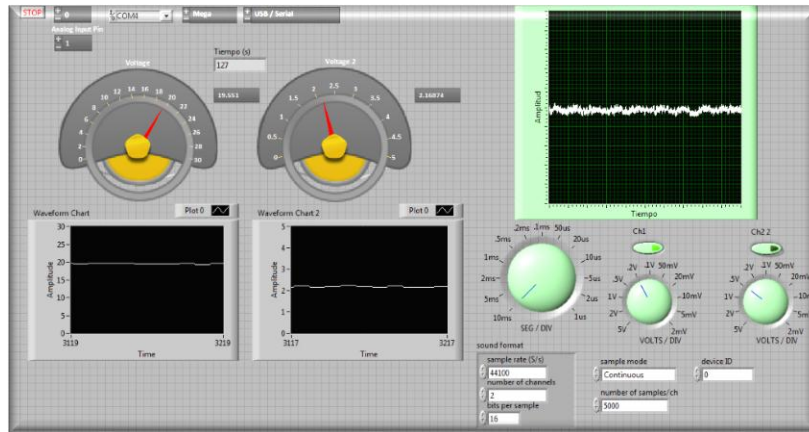
- **Medio ambiente**

Además se diseñó un dispositivo para captar los datos del **medio ambiente** a través de la tarjeta “Arduino” y por medio del programa “LabView” (medidor del medio ambiente), se establecieron los sensores para captar los niveles de luz, ruido, temperatura ambiente y humedad ambiente que se esté generando en el lugar donde se lleve a cabo la investigación.

En la Figura 4.6 se muestra la pantalla del diagrama esquemático de captación (interfaz visual) que se diseñó en el programa de “LabView” y a través de la tarjeta “Arduino” se puede captar los datos del medio ambiente, con la estructura del panel diseñado con los datos de luz, sonido, temperatura y humedad.

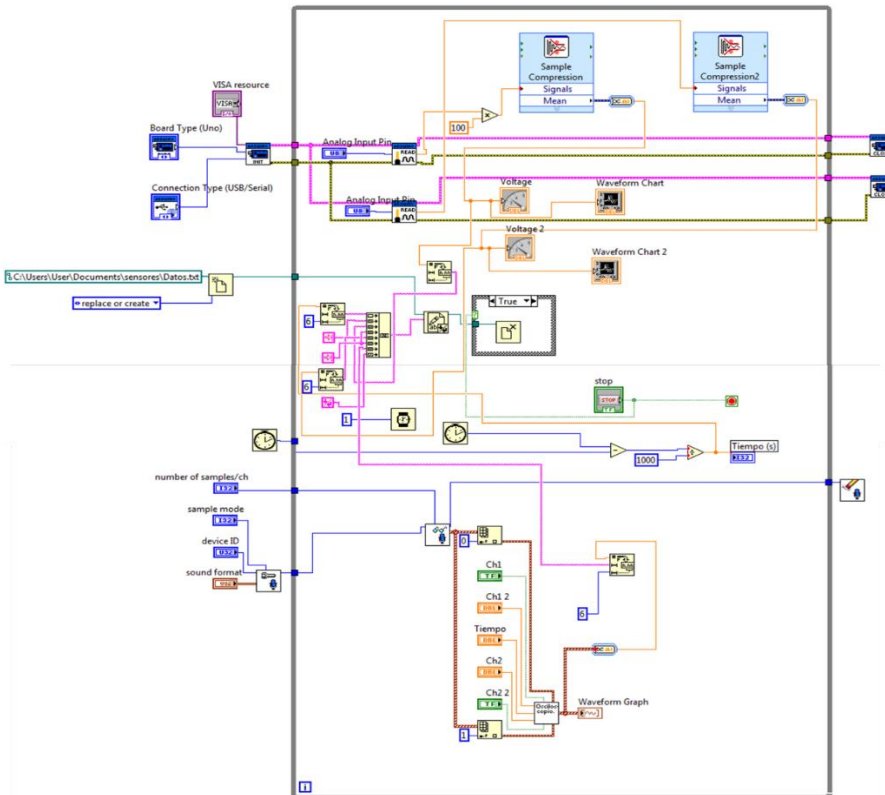


**Figura No. 4.6** Estructura del panel de control para medir el medio ambiente.



Fuente: Laboratorio de Robótica Avanzada e Interfaces Hápticas. UAEH-ICBI-CITIS

**Figura No. 4.7** Bloque esquemático para la captación de las variables del medio ambiente.



Fuente: Laboratorio de Robótica Avanzada e Interfaces Hápticas. UAEH-ICBI-CITIS.

Los datos generados se guardaran en un archivo.txt, con la siguiente estructura:

**Archivo ambientales (ambientales.txt)**

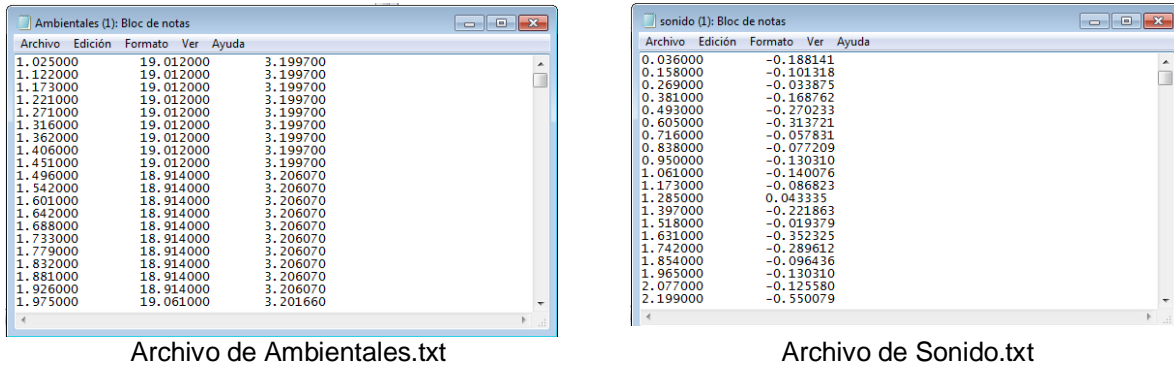
- Columna 1; se guardan los datos del tiempo, en segundos lo que tarda el participante en realizar la tarea.
- Columna 2; se guardan los datos que se registran de la temperatura ambiente.
- Columna 3; se guardan los datos de la iluminación que tenga el espacio donde se realizará la tarea.

**Archivo sonido (sonido.txt)**

- Columna 1; se guardan los datos del tiempo, en segundos lo que tarda el participante en realizar la tarea.
- Columna 2; se guardan los datos del ruido en volts, que esté ocurriendo en el momento de la investigación.

En la Figura 4.8 se muestran la estructura de los archivos que se generaron por cada participante en la investigación.

**Figura No. 4.8** Estructura de los archivos ambientales en extensión txt



**4.1.2 Espacio de trabajo**

La plataforma experimental consiste en los siguientes elementos:

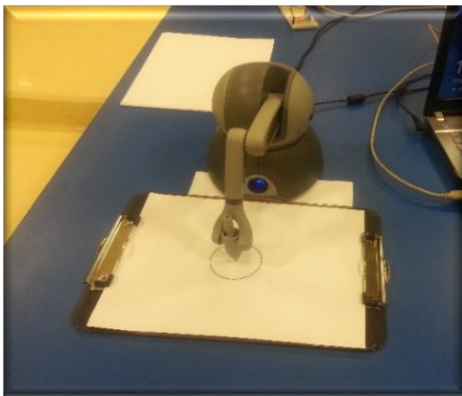
*Dispositivo háptico;* consiste en PHANToM Omni, el cual guía al participante en la trayectoria en el espacio de trabajo.

*Ambiente real*; consiste de dos ambientes, uno el diseño de un hipertubo en 3D y el segundo en un trazo en una plataforma de vidrio con una circunferencia de 4cm. de radio, equivalente a la diseñada como referencia en el control.

*Operador humano*; estudiante del Instituto de Ciencias de la Salud; persona que no presente alguna condición física o mental específica.

Con la finalidad de explicar al sistema de guiado háptico, el operador humano es estimulado kinestésicamente por medio del dispositivo háptico en sus dos tareas hipertubo y circunferencia el cerebro procesa la información, y se almacena en la memoria kinestésica, de esta manera el operador humano genera una fuerza de perturbación. Datos que son guardados para el análisis.

**Figura No. 4.9** Espacio de trabajo en el CLEMPS donde se llevó a cabo la investigación



Espacio de trabajo de la circunferencia



Espacio de trabajo del hipertubo



Espacio de trabajo para captar el medio ambiente

**Fuente:** Fotos realizadas en el momento de la investigación Marzo 2014.

## 4.2 Evaluación experimental.

Esta investigación denominada “Evaluación de un Sistema de Interacción Física Hombre-Robot” no tiene precedentes en el país y tiene gran afinidad con las ciencias de la salud y se trata de un tema de gran relevancia en Robótica que se ha venido trabajando en el Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (ICBI) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, en los últimos 10 años, la cual se encuentra vinculada al Proyecto: “Laboratorio para la caracterización, análisis biomecánica y neurorehabilitación robótica de pacientes con discapacidad motriz”.

Para llevar a cabo esta investigación en el Instituto de Ciencias de la Salud, específicamente en las instalaciones del Centro Latinoamericano de Estudios Médicos por Simulación (CLEMS); se realizó un protocolo de investigación que fue evaluado por el “Comité de Ética e Investigación del ICSa”, emitiendo el dictamen mediante oficio No. 019/20014 como se muestra en el Apéndice E: “Oficio de Comité de Ética e Investigación”; donde autorizan la investigación.

Con la finalidad de continuar con el estudio se planteó a las 3 Áreas Académicas participantes la muestra a alcanzar y se realizó un calendario de actividades con los grupos, número de participantes, fecha y hora. Como se muestra en la Figura 4.10.

**Figura No. 4.10** Cronograma de actividades de la investigación

Sede: CLEMPS “Centro Latinoamericano de Educación Médica por Simulación”.

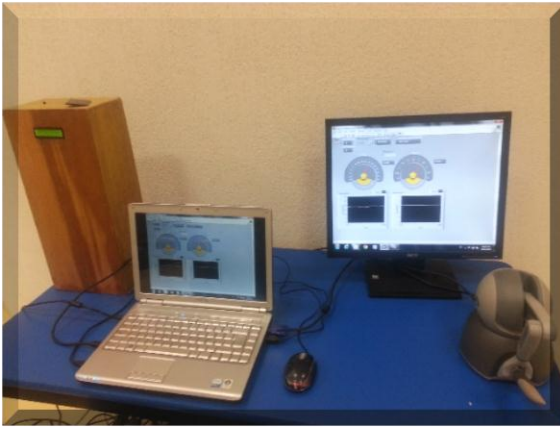
Día/Mes	Hora	Semestre	No. Alumnos	Área Académica
Martes 11 Marzo	10:00-12:00 hrs	Noveno	35	Odontología
	12:00-14:00 hrs	Séptimo	20	Medicina (Dr. Juan Fco.)
	18:00- 20:00 hrs	Octavo	26	Medicina
Miércoles 12 Marzo	10:00-12:00 hrs	Octavo	35	Odontología
	12:00-14:00 hrs	Séptimo	31	Odontología
Jueves 13 Marzo	9:00- 11:00 hrs	Cuarto 3	36	Enfermería
	11:00-13:00 hrs	Tercero	30	Medicina (LEDP)
	13:00- 15:00hrs	Séptimo 1	35	Enfermería
<b>Total</b>			<b>248</b>	

Fuente: Diseñó de Rosario Barrera-Gálvez & Omar Domínguez-Ramírez 2014

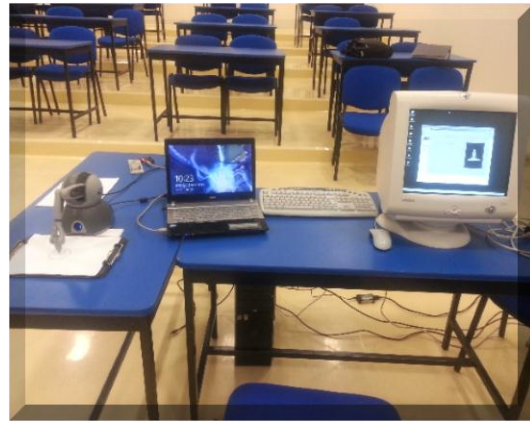
Una vez contando con las autorizaciones correspondientes y la confirmación de los grupos a participar en esta investigación, se llevó a cabo conforme a lo planeado.

Se instaló el equipo en un aula de simulación del CLEMS; como se muestra en la Figura 4.11.

**Figura No. 4.11** Espacio físico donde se llevó a cabo la investigación.



Sistema del Hipertubo y medio ambiente



Sistema de Circunferencia

**Fuente:** Fotos realizadas en el momento de la investigación Marzo 2014.

Conforme llegaron los estudiantes a participar en la investigación, se les explicó el objetivo del estudio y los pasos a seguir para desarrollar en buen término la actividad.

1. Capacitación a los usuarios con los dispositivos hápticos (brazo robótico)
2. Toma de signos vitales.
3. Realización de la carga de trabajo (hipertubo y circunferencia)
4. Toma de signos vitales.
5. Contestar el cuestionario de NASA TLX.

Este estudio se llevó a cabo en 3 días con la participación de 248 estudiantes de las Áreas Académicas de Enfermería, Odontología y Medicina.

Se anexa en un disco compacto las imágenes y videos que se tomaron en la realización de este estudio.

# Capítulo 5

## Resultados experimentales de evaluación y entrenamiento



En el presente capítulo se describirá el análisis de los datos obtenidos en la aplicación del cuestionario NASA TLX, captura de los datos y emisión de resultados permitieron evaluar un Sistema de Interacción Física Hombre-Robot y los datos obtenidos a través de los sistemas computacionales que se generaron en cada experimento al realizar la tarea de navegación de guiado háptico por participante.

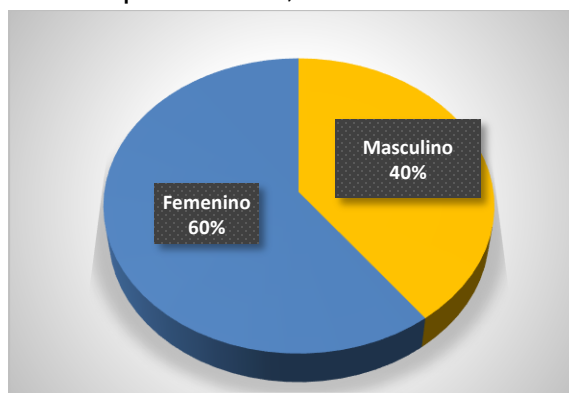
## 5.1 Estadística descriptiva de las variables.

### 5.1.1 Variables generales de la aplicación del cuestionario NASA TLX

Los participantes en la muestra del estudio fueron seleccionados toda vez que cumplieron con los criterios de inclusión, exclusión y/o eliminación; se obtuvieron resultados confiables de 204 encuestas, de una muestra de 248 participantes que se tenían contemplada, por lo que al respecto se cumplió con el cometido de evitar un error de selección y con la muestra del 95% de confiabilidad con un límite de aceptación del 1.65 con un error aceptable 0.05, mismo que es la diferencia máxima entre la media muestral y la media de la población que se está dispuesto a aceptar con un nivel de confianza que se ha definido, el cual se calculó utilizando una hoja de Excel donde se analizaron con los datos, con este dato nos indica un tamaño de muestra aceptable para el estudio.

Se trabajó con las 204 encuestas que cumplieron con todas las características, de estas 123 corresponden a usuarios femeninos y 81 a masculinos, como se muestra en la Gráfica 5.1.

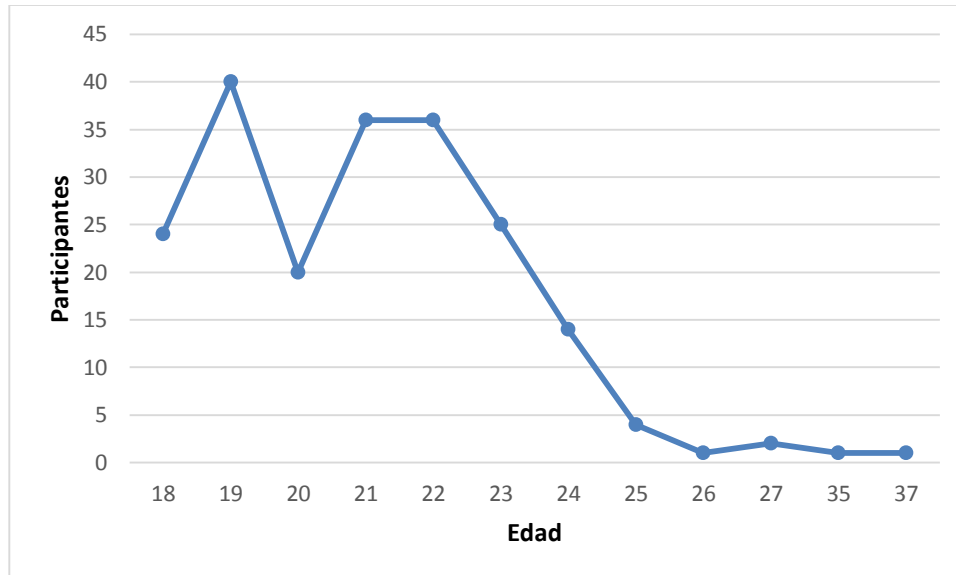
**Gráfica No. 5.1** Encuestados por Género, ICSa-2014



**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario "Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX". Barrera; Domínguez; 2014.

Dentro de las variables demográficas se identificó la edad de los participantes, como se muestra en la siguiente Gráfica No. 5.2 Edad de los participantes.

**Gráfica No. 5.2** Edad de los participantes, ICSa-2014



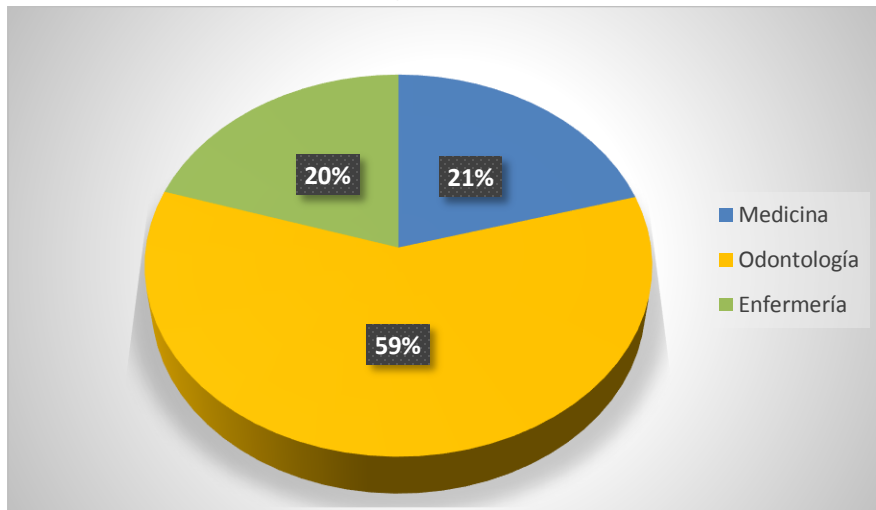
**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario “Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX. Barrera; Domínguez; 2014.

De la gráfica identificó que los participantes tienen entre 18 y 20 años el 41%; de 21 a 23 años el 48%; de 24 a 26 años el 9% y que tienen más de 27 años el 2% del total.

En cuanto a la participación por Programa Educativo, se identificó que el 59% fueron del PE de Odontología; el 20% del PE de Enfermería y el 21% del PE de Medicina. Como se muestra en la siguiente Gráfica No. 5.3.



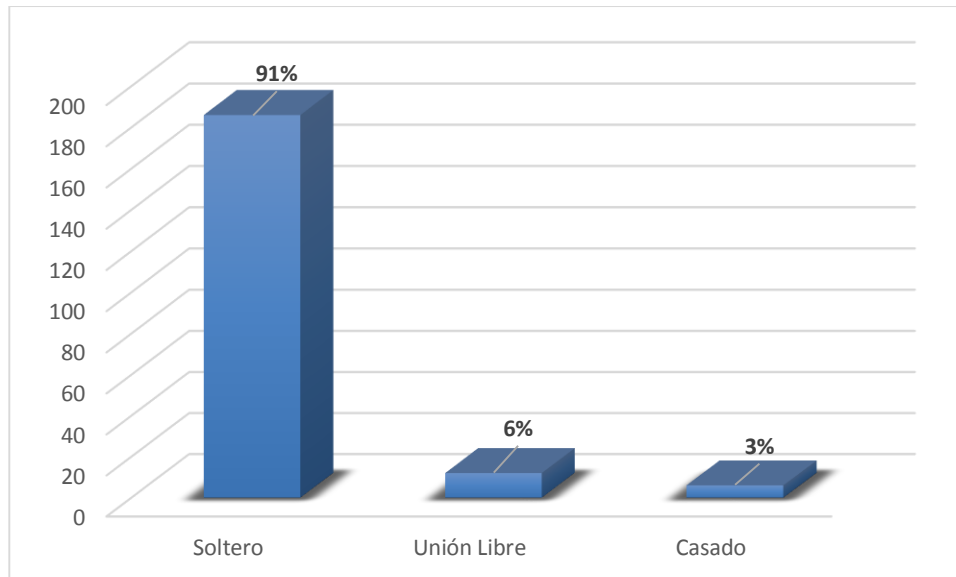
**Gráfica No. 5.3** Participación por Programa Educativo, ICSa-2014



**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario “Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX. Barrera; Domínguez; 2014.

Además, se identificó el estado civil de los participantes encontrando que 91% son solteros; el 6% viven en unión libre y el 3% son casados, como se muestra en la Gráfica No. 5.4.

**Gráfica No. 5.4** Estado Civil de los participantes, ICSa-2014

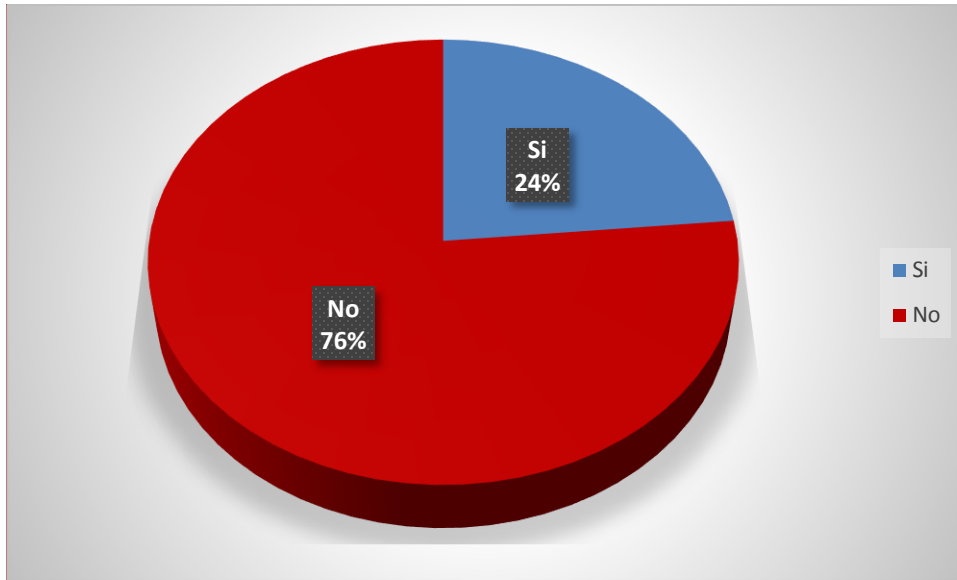


**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario “Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX. Barrera; Domínguez; 2014.



Al preguntarles a los participantes ¿tienen experiencia en juegos de realidad virtual?, se identificó que el 76% no y el 24% si tiene experiencia, como se muestra en la Gráfica No 5.5.

**Gráfica No 5.5** Tiene experiencia en juegos de realidad virtual, ICSa-2014



**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario “Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX. Barrera; Domínguez; 2014.

Cabe destacar que de los 204 participantes se identificó el 67% son originarios del estado de Hidalgo; el 29% del resto de la República Mexicana y el 4% del extranjero.

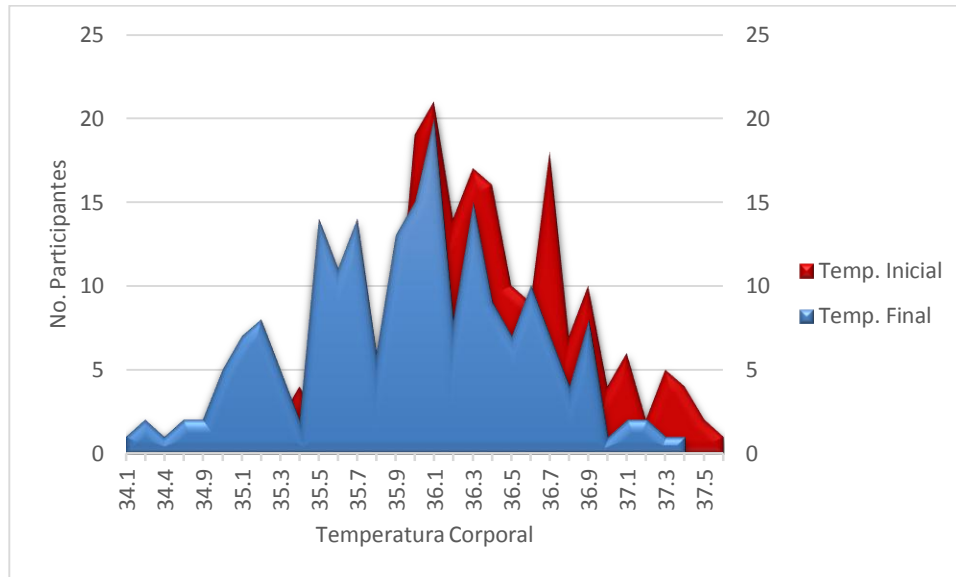
## Signos Vitales

- **Temperatura corporal**

La temperatura corporal del ser humano normal; varía dependiendo de su sexo, su actividad reciente, el consumo de alimentos y líquidos, la hora del día y, en las mujeres, de la fase del ciclo menstrual en la que se encuentren. La temperatura corporal normal, de acuerdo con la Asociación Médica Americana (American Medical Association), puede oscilar entre 97,8° F (o Fahrenheit, equivalentes a 36,5°C, o Celsius) y 99°F (37,2°C). La temperatura corporal se puede tomar de las siguientes maneras: oral; axilar; rectal; en el oído y en la piel.

En esta investigación la temperatura corporal se tomó por medio de la axila, con termómetros digitales y con un reposo de 10 minutos después de la llegada al CLEMPs. Del total de participantes se identificó que mostraron cambios en su temperatura corporal, como se muestra en la Gráfica No 5.6. La tendencia global del pre y post del experimento.

**Gráfica No 5.6** Temperatura corporal inicial y final del total de los participantes, ICSa-2014



**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario “Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX. Barrera; Domínguez; 2014.

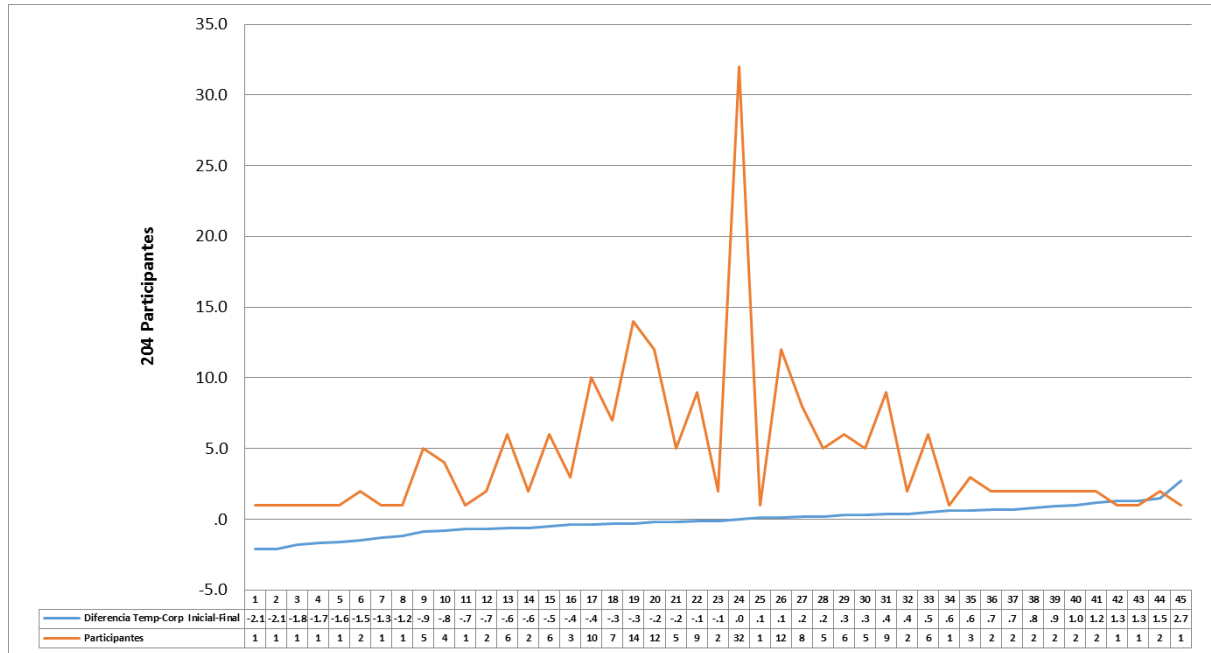
En la gráfica No. 5.6 se puede identificar una variación constante en el registro de temperatura corporal antes de iniciar el experimento y después de realizarlo. El promedio de temperatura inicial se identificó en los 36.1 grados; la media de 36.2 grados y la varianza en 0.381; para el caso de temperatura final el promedio fue 36.5 grados; una media de 36.3 grados y una varianza de 0.444.

Del total de los participantes se identificó que el 20% tienen la edad de 19 años y con ello la mayor variación en la temperatura corporal.

En cuanto al PE se identificó que Odontología tuvo la mayor variación de temperatura corporal, debido a que representa el 60% del total de los participantes.

La Gráfica No 5.7 muestra las variaciones de la temperatura corporal del total de los participantes.

**Gráfica No 5.7** Número de eventos con variación en la temperatura corporal Inicial menos la final del total de participantes, ICSa-2014



**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario “Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX. Barrera; Domínguez; 2014.

En la temperatura corporal de los 204 participantes encuestados con datos válidos, se identificó una variación de grados en 45 registros que van del -2.1 al 2.7 puntos; en el cero encontramos 32 registros de los participantes que se mantuvieron estables en el desarrollo de la investigación; es decir el 16% de los participantes no presentó ningún cambio en su temperatura corporal.

Se puede deducir que el cuerpo humano al realizar un esfuerzo, sufre un incremento de su temperatura corporal; esto se debe a los movimientos de sus músculos y a la tensión de la carga mental ejercida.

- **Frecuencia cardíaca**

La frecuencia cardíaca se define como el número de contracciones del corazón o pulsaciones por unidad de tiempo. Su medida se realiza en unas condiciones

determinadas (reposo o actividad) y se expresa en latidos por minutos. La medida del pulso se puede efectuar en distintos puntos, siendo los más habituales, la muñeca, en el cuello (sobre la arteria carótida) o en el pecho. Con independencia de la técnica de medida, el procedimiento que se recomienda seguir, para evitar errores en la medida y para que los valores obtenidos sean comparables [41], es el siguiente:

1. Medir la FC en nmn de reposo, en un local a temperatura ambiente entre 20-24 °C y en posición sentada.
2. Realizar la medida de la FC mediante el contacto físico 1 minuto antes de realizar la medida de la presión sanguínea.
3. Repetir dos veces la medición y calcular el valor promedio.

La frecuencia cardíaca en reposo depende de la genética, el estado físico, el estado psicológico, las condiciones ambientales, la postura, la edad y el sexo. Un adulto sano en reposo tiene generalmente el pulso en el rango 60-100. Durante el ejercicio físico, el rango puede subir a 150-200. Durante el sueño y para un atleta joven en reposo, el pulso bien puede estar en el rango 40-60.

En la siguiente gráfica, se muestran datos de la frecuencia cardíaca tomada a los participantes de los cuales se pueden ver variaciones al iniciar y concluir la investigación.

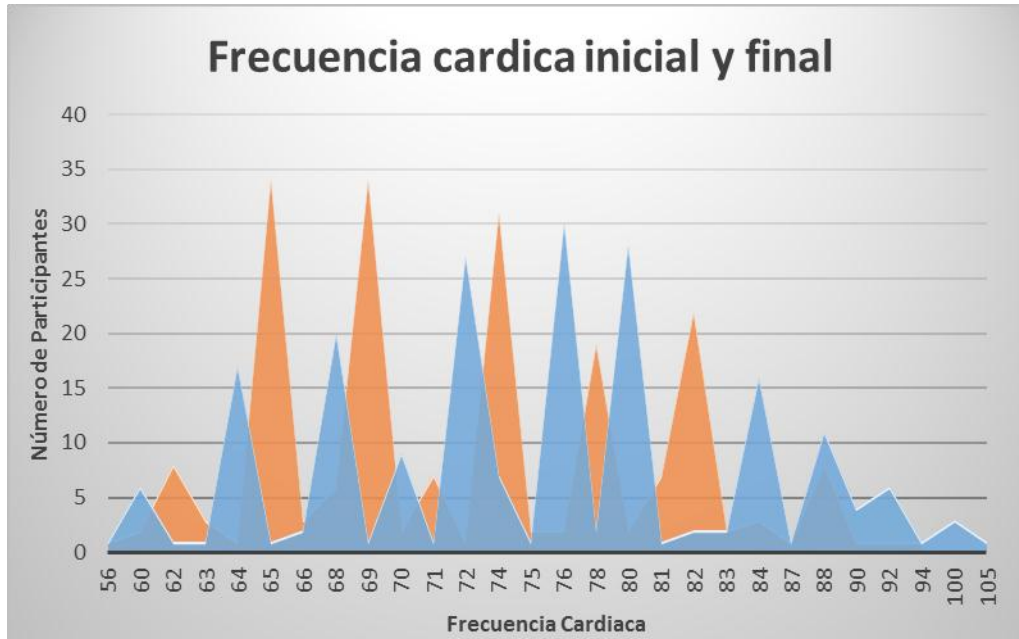
**Tabla No. 5.1** Valores estadísticos de la frecuencia cardíaca inicial y final; ICSA, 2014

Valores estadísticos de N=204	Frecuencia Cardíaca Inicial	Frecuencia Cardíaca Final
Media	71.62	75.81
Mediana	71.50	76.00
Moda	64 <sup>a</sup>	76
Desv. típ.	7.946	8.843
Varianza	63.144	78.193

**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario “Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX. Barrera; Domínguez; 2014.



**Gráfica No 5.8** Frecuencia cardiaca inicial y final; ICSa-2014



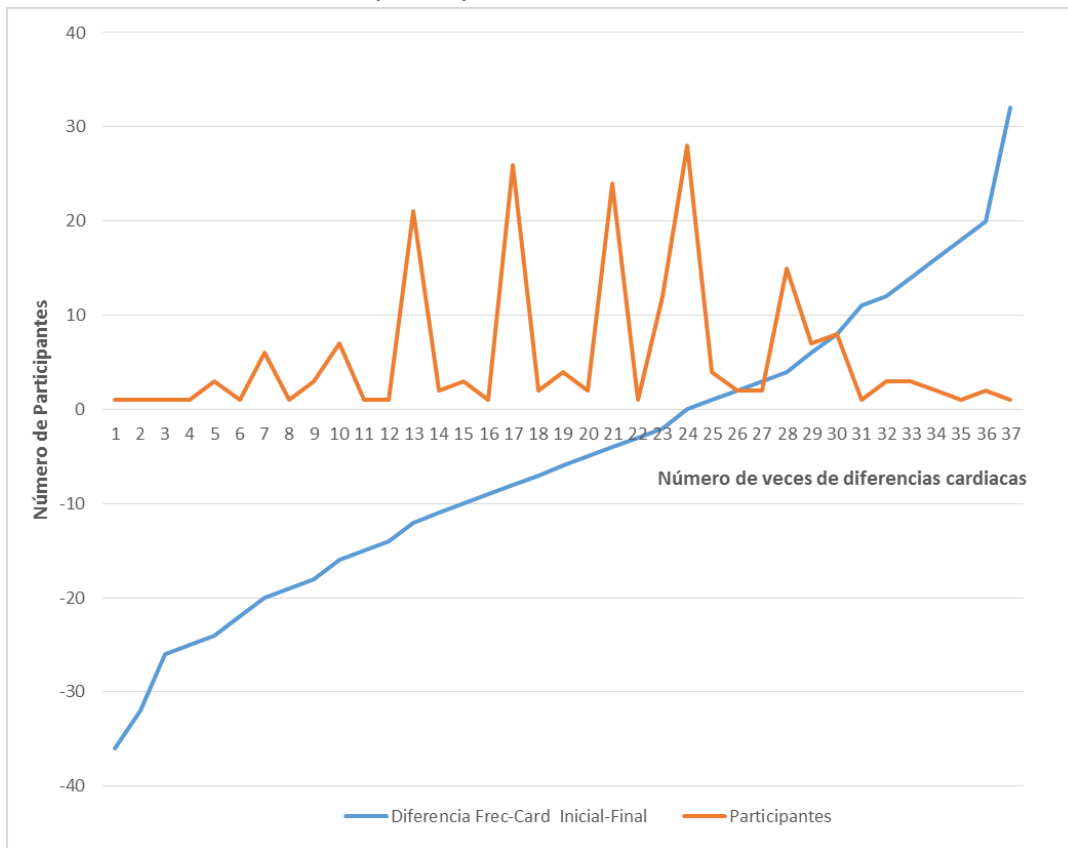
**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario "Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX. Barrera; Domínguez; 2014.

La frecuencia cardiaca se tomó en reposo y los resultados se pueden ver en la Gráfica No. 5.8 donde se registraron al inicial se mostró un rango de 52 a 104 pulsaciones y la finalizar la tarea de carga se registraron de 56 a 105 pulsaciones por minuto.

Se identificó una media al iniciar de 71.6 pulsaciones y al finalizar de 76 pulsaciones por minuto.

En la Grafica 5.9 se identifican las variaciones de las pulsaciones al iniciar y finalizar el experimento las cuales van de -40 a 35 registros, es decir se presentaron 75 variaciones.

**Gráfica No 5.9** Número de eventos con variación en la frecuencia cardiaca inicial menos la final del total de los participantes, ICSa-2014

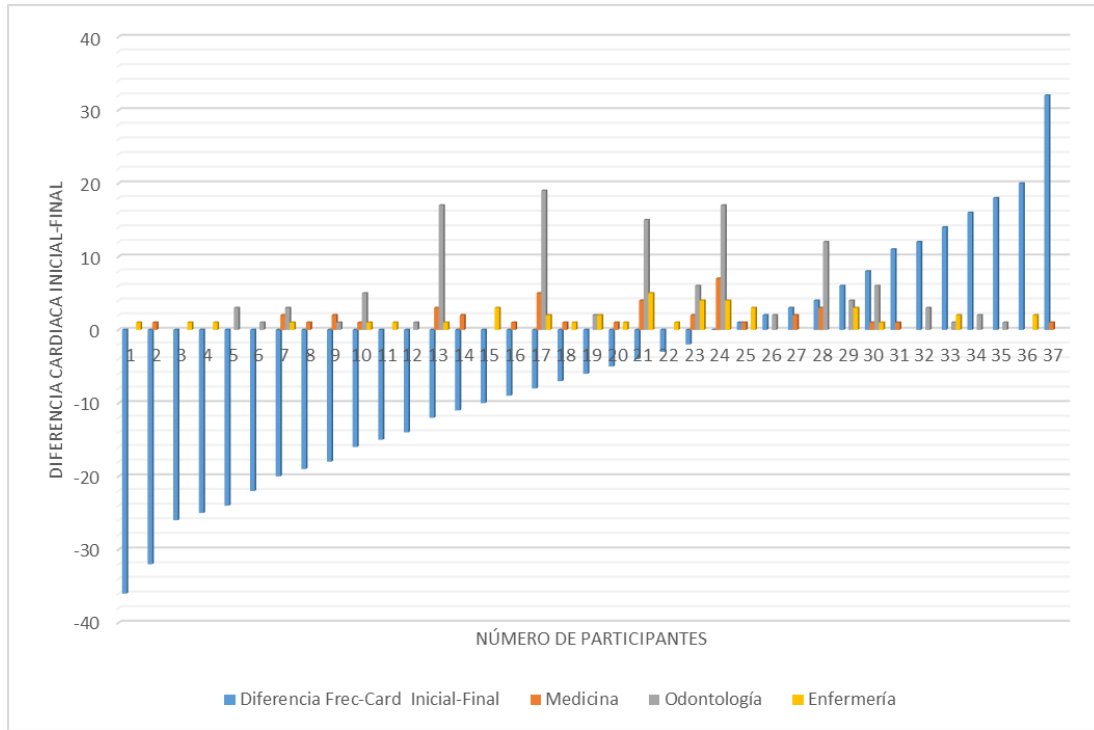


**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario “Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX. Barrera; Domínguez; 2014.

En las variaciones de frecuencia cardiaca se identificó que el 40% está representado por el género masculino y el 60% por el femenino.



**Gráfica No 5.10** Número de eventos con variación en la frecuencia cardiaca Inicial menos la final por Programa Educativo, ICSa-2014



**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario “Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX. Barrera; Domínguez; 2014.

- **Presión Arterial**

Definición de la Presión Arterial, es la fuerza hidrostática de la sangre sobre las paredes arteriales que resulta de la función de bombeo del corazón, volumen sanguíneo, resistencia de las arterias al flujo y diámetro del lecho arterial y según la Secretaría de Salud<sup>15</sup> se clasifica en:

- **Hipertensión arterial sistémica:** Padecimiento multifactorial caracterizado por aumento sostenido de la presión arterial sistólica, diastólica o ambas, en ausencia de enfermedad cardiovascular, renal o diabetes >140/90 mmHg, en caso de presentar enfermedad cardiovascular o diabetes >130/80 mmHg y en caso de tener proteinuria mayor de 1.0 gr. e insuficiencia renal >125/75 mmHg.

<sup>15</sup> SSA-NOM 030-. Para la prevención, detección, diagnóstico, tratamiento y control de la hipertensión arterial sistémica.



- **Hipertensión arterial secundaria:** Elevación sostenida de la Presión Arterial, por alguna enfermedad nosológica >140 mmHg (sistólica) o >90 mmHg (diastólica).
- **Hipertensión arterial descontrolada:** Elevación sostenida de las cifras de presión arterial sistólica, diastólica o ambas, acompañada o no de manifestaciones menores de daño a órgano blanco.

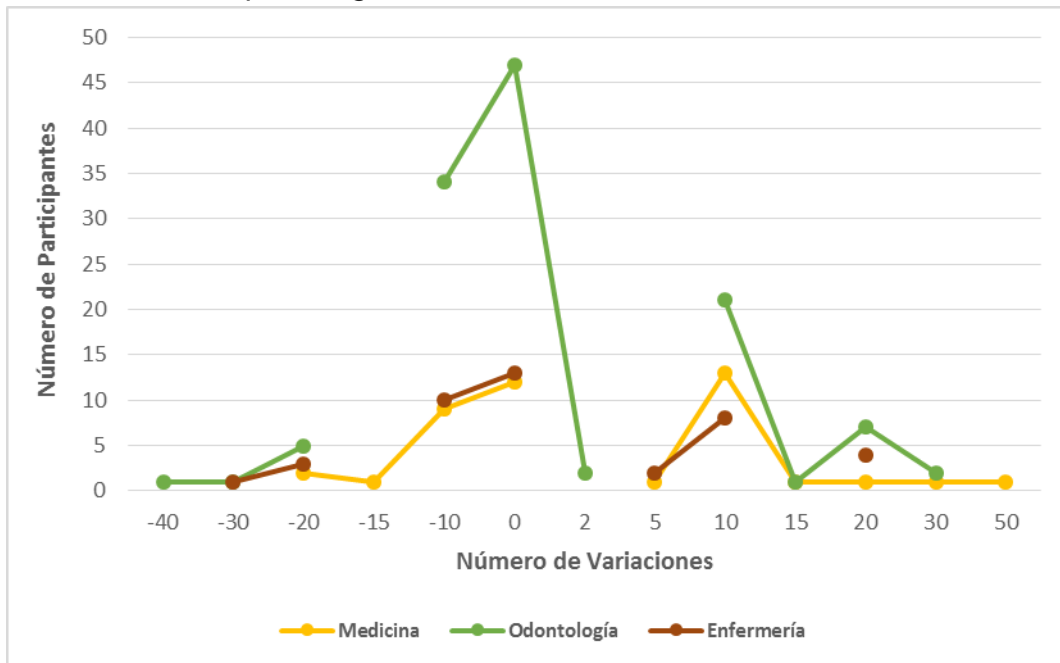
**Tabla No. 5.2** Clasificación de la presión arterial

Categoría	Sistólica mmHg.	Diastólica mmHg
Óptima	<120	<80
Presión arterial normal	120 a 129	80 a 84
Presión arterial fronteriza	130 a 139	85 a 89
Hipertensión 1	140 a 159	90 a 99
Hipertensión arterial 2	160 a 179	100 a 109
Hipertensión arterial 3	>180	>110
Hipertensión sistólica aislada	>140	<90

Fuente: SSA-NOM 030 para la prevención, detección, diagnóstico, tratamiento y control de la hipertensión arterial sistémica.

En el desarrollo de esta investigación se captó que del total de los participantes el 35% se mantuvo estable en su presión arterial. La variación o estabilidad de la presión arterial podría estar relacionada con la experiencia del participante con juegos de realidad virtual, de los cuales se identificó el 31% que si tiene experiencia en juegos de realidad virtual, se mantuvo estable en su presión arterial.

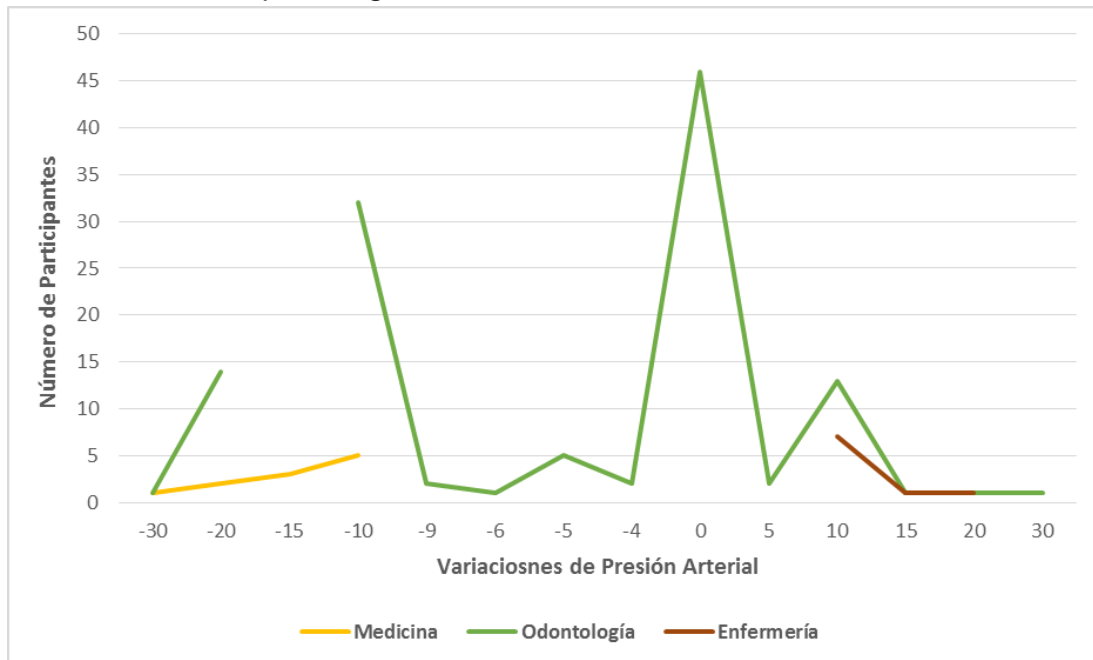
**Gráfica No 5.11** Número de eventos con variación en la presión arterial sistólica inicial menos la final por Programa Educativo, ICSa-2014



**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario “Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX. Barrera; Domínguez; 2014.

El 35% de los participantes no registró ningún cambio en su presión arterial sistólica tomada al inicio del experimento y al final de él. Al realizar el extracto de información se identificó que el 30% de los participantes del PE de medicina no registraron cambios; para el caso del PE de Odontología se identificó el 39% de los participantes y para el PE de Enfermería se identificó el 32% de los participantes sin cambios.

**Gráfica No 5.12** Número de eventos con variación en la presión arterial diastólica inicial menos la final por Programa Educativo, ICSa-2014



**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario "Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX. Barrera; Domínguez; 2014.

En la presión arterial diastólica al inicio y al finalizar el experimento se identificó que el 40% de los participantes no registró ningún cambio.

La variación o estabilidad de la presión arterial podría estar relacionada con la experiencia del participante con juegos de realidad virtual, de los cuales se identificó el 41% que si tiene experiencia en juegos de realidad virtual, se mantuvo estable en su presión arterial.

- **Medio Ambiente**

Los experimentos se realizaron en condiciones controladas con respecto al medio ambiente.

Con respecto a la temperatura y humedad; se identificó que a menor temperatura mayor humedad.

*La humedad del aire;* se debe al vapor de agua que se encuentra presente en la atmósfera y se mide en  $\text{mm}^3$ . El vapor procede de la evaporación de los mares y

---

océanos, de los ríos, los lagos, las plantas y otros seres vivos. La cantidad de vapor de agua que puede absorber el aire depende de su temperatura. El aire caliente admite más vapor de agua que el aire frío; según la teoría de la Ley de los Gases<sup>16</sup> de Boyle Mariotte [42].

La humedad es la cantidad de agua del ambiente constante y, si disminuye la temperatura, la humedad relativa va aumentando hasta que llega un momento en que se alcanza el 100%. Si sigue bajando la temperatura, el exceso de humedad (lo que supera el 100%) condensa en agua líquida. Por ejemplo: el aire a 24 °C con un 50% de humedad relativa, contiene unos 9 g de vapor por kilogramo de aire seco; si la temperatura del aire baja hasta los 13 °C, llegará al 100% y, en ese momento empezará a condensar (cambio de estado de la materia que se encuentra en forma gaseosa a forma líquida. Es el proceso inverso a la vaporización.). Si esto ocurre en el exterior, se formará rocío; en un local cerrado puede ocurrir en un lugar determinado, como en el vidrio de una ventana que tenga la temperatura de rocío y se condensará el agua en él.

*Temperatura ambiente*; es la temperatura que se puede medir con un termómetro y que se toma del ambiente actual, por lo que, si se toma de varios puntos en un área a un mismo tiempo puede variar.

Esto es debido a que una temperatura tomada en un ambiente tan frío como lo es el Polo Norte, donde la temperatura sería bajo cero (si se mide en grados Fahrenheit o en Centígrados), no será igual a una tomada en un lugar tan cálido como un desierto donde la temperatura estaría muy por encima del cero.

La siguiente tabla muestra los valores alcanzados en los días que se llevó a cabo la investigación.

---

<sup>16</sup> La Ley de los Gases dice “La presión ejercida por una fuerza física es inversamente proporcional al volumen de una masa gaseosa, siempre y cuando su temperatura se mantenga constante” o bien “A temperatura constante, el volumen de una masa fija de gas es inversamente proporcional a la presión que este ejerce”

**Tabla No. 5.3** Humedad ( $\text{mm}^3$ ) temperatura ambiente (gc) ICSa-2014

Humedad	Temperatura ambiente (Grados)							
	19	20	21	22	23	24	25	26
33							13	19
34					2	26		
35					11			
36	2	8	10	16	12	17		
37		16	19	12	6	6		
38				1	3			

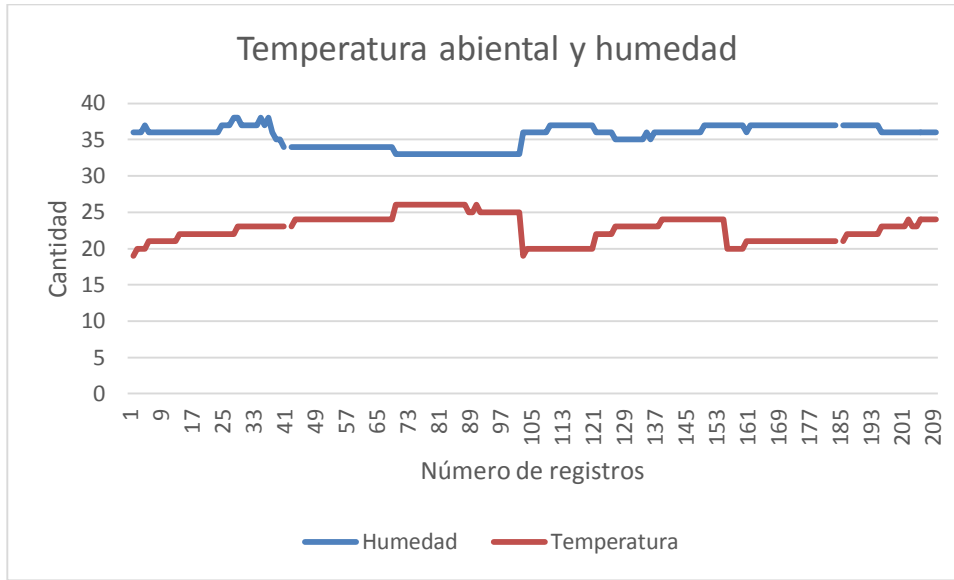
**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario "Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX. Barrera; Domínguez; 2014.

Como se puede observar en la tabla cuan más alta era la temperatura ambiente la humedad bajaba; el comportamiento de la mezcla de aire seco y vapor de agua sigue la ley de Boyle Mariotte de las presiones y volumen inicial y final; cuando aumenta la presión, el volumen baja, mientras que si la presión disminuye el volumen aumenta. Si se mantiene constante la cantidad de gas y la temperatura, se cumple la relación: de acuerdo a sus respectivas propiedades.

Para esta investigación se identificó que mientras la temperatura subía la humedad bajaba en el medio ambiente del aula que se utilizó en el CLEMPS durante el estudio; este elemento en el cuerpo del ser humano, realiza cambios; cuando la humedad es alta, el sudor del cuerpo no se evapora con facilidad y no puede bajar su temperatura correctamente; cuando es baja, en ambientes fríos, causa un exceso de pérdidas de calor del cuerpo por evaporación de agua, provocando sequedad de la piel y de las mucosas.

Como se observó en la investigación la humedad subía si la temperatura ambiente bajaba y eso se reflejó en la temperatura corporal de los participantes; este apartado se puede ver gráficamente.

**Gráfica No. 5.13** Temperatura ambiental y humedad ICSa-2014



**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario “Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX. Barrera; Domínguez; 2014.

Con respecto a la luz y el sonido, como se llevó a cabo la investigación en un área de simulación de un hospital, donde cuenta con los estándares de luz establecidos para un área de estudio, esos datos no cambiaron y, por reglamento, se mantiene en silencio se identifica en los datos captados que se presentaba un mínimo de ruido al iniciar la investigación y conforme avanzaba el proceso llegan a subir y se mantenía en un bullicio leve y casi estable como se muestra en las Gráficas 5.14 y 5.15.

Con respecto a la Luz, se presentan algunas definiciones que se manejan para establecer los estándares y se define como *Flujo luminoso* la cantidad de luz emitida por una fuente luminosa y su unidad es el lumen.

La *intensidad luminosa*: Se define como la cantidad de flujo luminoso, propagándose en una dirección dada, que atraviesa o incide sobre una superficie por unidad de ángulo sólido. Su unidad es la candela (cd).

La *Iluminación o iluminancia*: es el flujo luminoso que incide sobre una superficie. Su unidad es el lux.

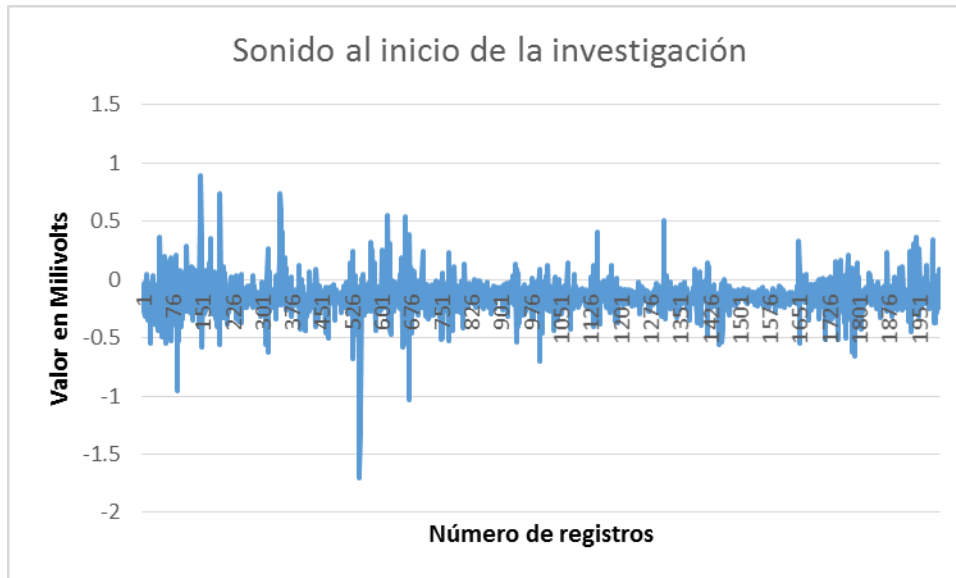
- 1 Lux = 1 lumen x metro cuadrado.
- 1 Lux = 0.093 pie-candelas (pie).
- 1 Pie-Candela = 10.8 Luxes (o lúmenes por metro cuadrado).

En la investigación se mantuvo el dato de 3 lúmenes x metro cuadrado y éste fue constante debido a las características físicas y de infraestructura del CLEMPS.

El sonido, se trasmite a través de ondas sonoras. El sonido es cuando las vibraciones tienen una frecuencia regular. Y el ruido es cuando las vibraciones que se producen tienen una frecuencia irregular.

Durante la investigación, se tuvo presencia de ruido como se muestra en las Gráficas 5.14 y 5.15.

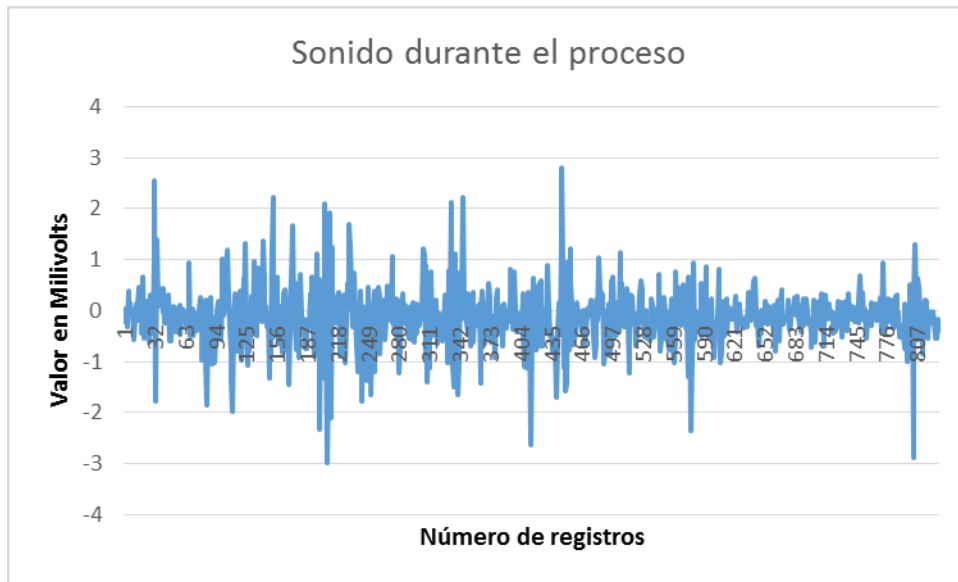
**Gráfica No. 5.14** Sonido al inicio de la investigación ICSa-2014



**Fuente:** N=204 Datos obtenidos por el programa LabView diseñado por Laboratorio de Robótica Avanzada. Domínguez-ET Al UAEH-ICBI-CITIS 2014, Análisis de datos por Barrera; Domínguez; 2014.

En esta gráfica se puede observar que el sonido es constante dado que no hay perturbaciones de ruido dentro del área de investigación ubicada en el CLEMPS del ICSa.

En la Gráfica 5.15 las personas que participaron en esta investigación generaron un ruido tal que se pueden observar picos en microvolts altos.

**Gráfica No. 5.15** Sonido durante el proceso ICSa-2014

**Fuente:** N=204 Datos obtenidos por el programa LabView diseñado por Laboratorio de Robótica Avanzada e Interfaces Hápticas. UAEH-ICBI-CITIS, Análisis de datos por Barrera-Gálvez R. & Domínguez-Ramírez O.; 2014.

### 5.1.2 Dispositivo háptico Phantom Omni

Los datos identificados en el dispositivo háptico que se utilizó en esta investigación fue un modelo “Omni” que hace posible que los usuarios puedan tocar y manipular objetos virtuales de seis grado de libertad de detección posicional.

Es un dispositivo subactuado, el cual entrega la posición y velocidad de la ejecución de la aplicación computacional en el plano cartesiano 3D.

Dentro de la investigación y con el dispositivo háptico Phantom Omni, tenemos comunicación con una computadora, por medio de la cual se envía la consigna al dispositivo para ejecutar el guiado háptico; esto permite tener un desplazamiento del dispositivo en el espacio de trabajo proporcionando así los valores de la posición y velocidad, los cuales se analizaron determinando el desempeño de los participantes.



Se analizaron los datos del guiado activo, donde los participantes tuvieron diferentes tiempos en la carga de trabajo identificando como un mínimo de 10 segundos; un máximo de 133 segundos y un promedio de 32 segundos. Como se muestra en la siguiente gráfica.

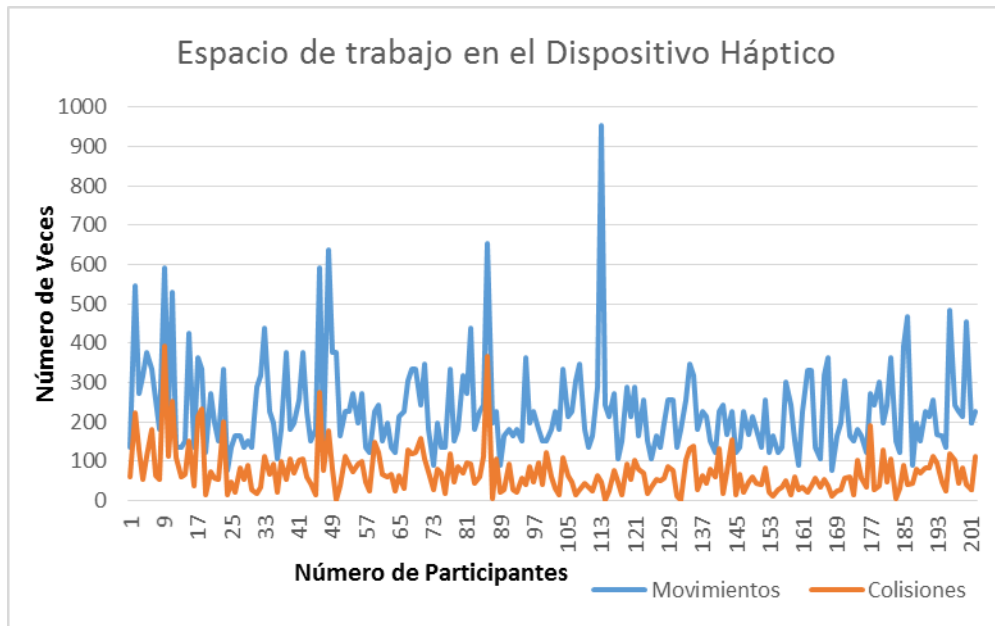
**Gráfica No. 5.16** Tiempo de ejecución con los dispositivos hápticos



Fuente: N=204 archivos analizados por Barrera-Gálvez R. & Domínguez-Ramírez O.; 2014.

En la Gráfica 5.17 se puede identificar que los participantes realizaron en promedio 233 movimientos en el espacio de trabajo con un mínimo de 75 movimiento y un máximo de 952 movimiento; además de identificar las colisiones para el primer ejercicio donde en promedio fueron 71 y como máximo 393 y como mínimo 0 es decir una persona realizó la trayectoria sin colisiones; para el segundo ejercicio solo se determinó el desempeño al realizar una circunferencia sobre una superficie como se muestra en el Apéndice F. Espacio de trabajo de la circunferencia.

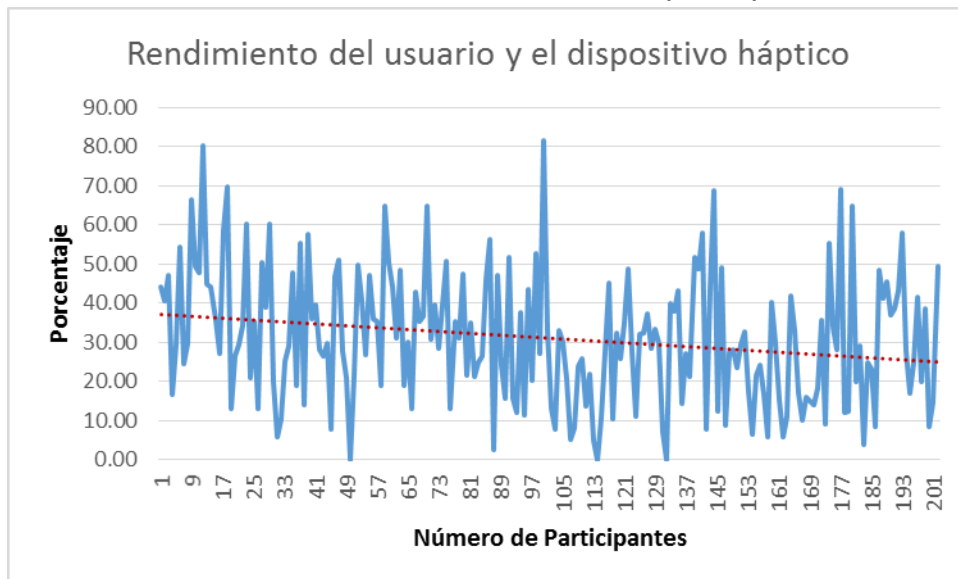
**Gráfica No. 5.17** Espacio de trabajo de los dispositivos hápticos



Fuente: N=204 archivos analizados por Barrera-Gálvez R. & Domínguez-Ramírez O.; 2014.

En la Gráfica 5.18 se puede observar el desempeño de los participantes realizando la carga de trabajo; donde el 31% de los movimientos realizados provocaron colisiones dentro del hipertubo.

**Gráfica No. 5.18** Rendimiento de movimientos de los participantes.



Fuente: N=204 archivos analizados Barrera-Gálvez R. & Domínguez-Ramírez O.; 2014.

Desempeño de los participantes según el número de colisiones que realizaron durante la carga de trabajo.

**Gráfica No. 5.19** Desempeño de los participantes



**Fuente:** N=204 archivos analizados Barrera-Gálvez R. & Domínguez-Ramírez O.; 2014.

El 65.8% de los participantes concluyeron la actividad de la carga de trabajo en el hipertubo y la circunferencia con una calificación de 10 y 9; es decir, realizaron la actividad independientemente de cómo se sintieron en el proceso, para el resto que es el 34.1% concluyó la actividad con una calificación menor.



## 5.2 Resultados de la aplicación del protocolo NASA TLX

En este apartado se realiza el análisis de los datos encontrados en la aplicación de la encuesta “Evaluación de una interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX”, que se describe en el capítulo III, particularmente en el punto 3.5 Instrumento de recolección de datos.

En este caso, la encuesta “Evaluación de una interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX”, en el apartado de NASA TLX cuenta con 6 sub-escalas que sirvieron para realizar el análisis e identificar el nivel de satisfacción del usuario en la realización de la carga de trabajo.

Durante el análisis de datos con el protocolo NASA TLX se identificó lo siguiente ver Tabla 5.4.

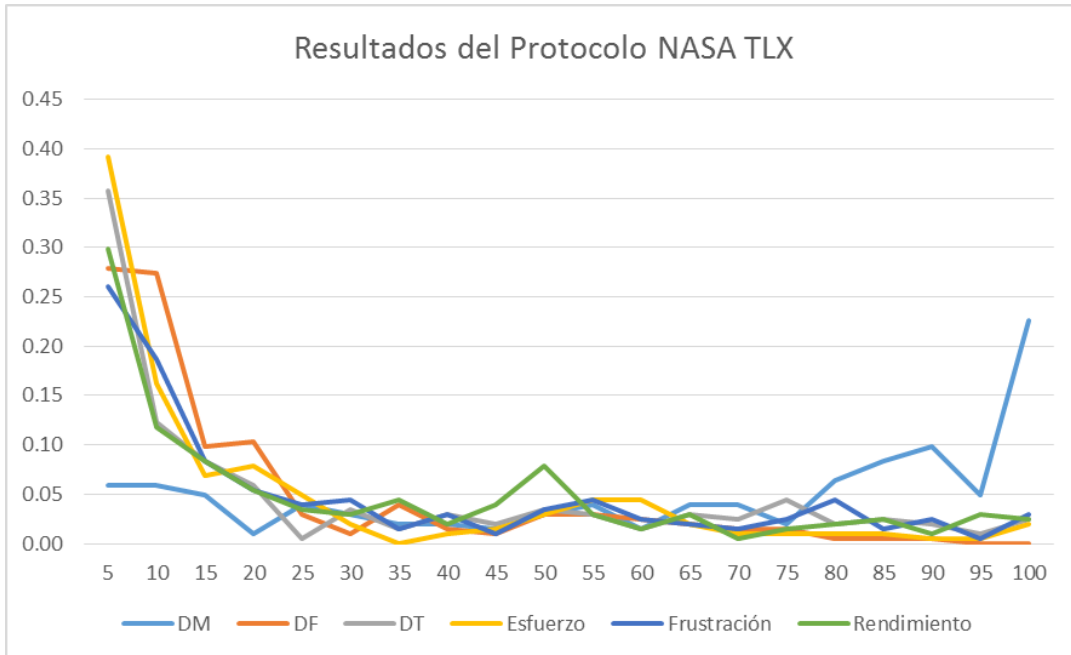
**Tabla No. 5.4** Resultados de la aplicación del protocolo NASA TLX

Escala NASA TLX	DM	DF	DT	Esfuerzo	Frustración	Rendimiento
5	0.06	<b>0.28</b>	<b>0.36</b>	<b>0.39</b>	<b>0.26</b>	<b>0.30</b>
10	0.06	0.27	0.12	0.16	0.19	0.12
15	0.05	0.10	0.08	0.07	0.08	0.08
20	0.01	0.10	0.06	0.08	0.05	0.05
25	0.04	0.03	0.00	0.05	0.04	0.03
30	0.03	0.01	0.03	0.02	0.04	0.03
35	0.02	0.04	0.01	0.00	0.01	0.04
40	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03	0.02
45	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.04
50	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.08
55	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03
60	0.01	0.02	0.01	0.04	0.02	0.01
65	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03
70	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00
75	0.02	0.01	0.04	0.01	0.02	0.01
80	0.06	0.00	0.02	0.01	0.04	0.02
85	0.08	0.00	0.02	0.01	0.01	0.02
90	0.10	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01
95	0.05	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03
100	<b>0.23</b>	0.00	0.02	0.02	0.03	0.02
Total	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario “Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX. Barrera; Domínguez; 2014.

Gráficamente encontramos lo siguiente Gráfica 5.20.

**Gráfica No. 5.20** Resultados de la aplicación del protocolo NASA TLX



**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario “Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX. Barrera; Domínguez; 2014.

Al realizar el análisis de los datos de los 204 participantes se identificó en la **Demanda Mental** que el 77% de los participantes refirió que no le generó una carga mental excesiva, que fue fácil la actividad y en un espacio cómodo, asegurando que el factor del ruido no le generó molestia; a diferencia del 23% que identificó que sí les generó una carga de trabajo con el uso de los dispositivos hápticos; el promedio de la carga de trabajo que se registró fue del 40% en el total de los participantes.

En el caso de la **Demanda Física** el 28% de los participantes expresó que no requirió de actividad física; cubrieron la actividad expresando que fue fácil sus miembros superiores se encontraron libres, sin ninguna molestia músculo esquelética y expresó que la tarea le generó habilidad y destreza, rápida y no requiero de esfuerzo físico a diferencia del 72% de los participantes que expresó que si requirió de demanda física.

En la ***Demanda Temporal***; el 36% de los participantes no sintió presión de tiempo con respecto a la actividad, la realizó de una manera más tranquila y sin presión a diferencia del 64% que sintió estrés al realizar la actividad, sintió que la información que tenía no era clara y la actividad fue difícil y complicada.

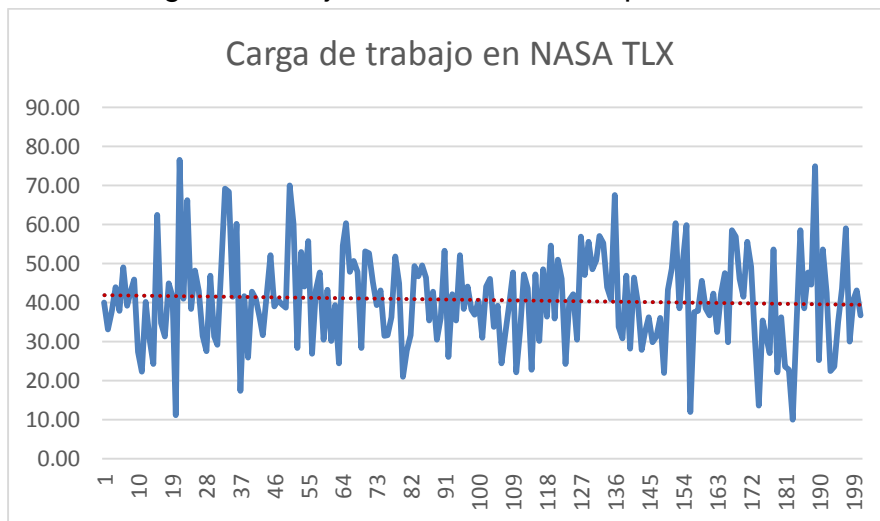
Para la sub-escala del ***Esfuerzo***, el 39% expresó que no identificaron difícil la actividad de manera mental y físicamente, sin embargo concluyeron de manera satisfactoria la actividad; el 61% expresó que si le genero esfuerzo, atención durante la tarea para concluirla y se sintió activo al realizar la tarea.

Para el caso de ***Frustración***; el 26% expresó que no le genero inseguridad, se sintió satisfecho sin nerviosismo y el 74% se sintió inseguro, insatisfecho, no relajado y se sintió con tensión al realizar la tarea.

Finalmente, en la sub-escala de ***Rendimiento***, el 70% sintió satisfacción en el cumplimiento de la actividad siendo de corta duración, expresando que el protocolo NASA TLX utilizado fue claro, así como la planificación de la tarea; a diferencia del 30% restante.

En la Gráfica No. 5.21, se identifica claramente la carga de trabajo que le generó al grupo de los participantes en esta investigación mediante el uso del protocolo NASA TLX.

**Gráfica No. 5.21** Carga de trabajo identificada con el protocolo NASA TLX



**Fuente:** N=204 Aplicación del Cuestionario “Evaluación de una Interfaz Hombre-Robot basado en el protocolo NASA TLX. Barrera; Domínguez; 2014.

Se encontraron 152 valores diferentes en un rango mínimo de 10% y un máximo de 76.66% y con una desviación estándar de 12.36 y una media que se encuentra es del 40% en la carga de trabajo donde podemos inferir que realizaron la actividad de manera satisfactoria.

Al concluir la investigación se encontró que a los participantes sí les generó estrés de una u otra manera en la realización de la carga de trabajo y el estrés (del inglés stress, “tensión”) es una reacción fisiológica del organismo en el que entran en juego diversos mecanismos de defensa para afrontar una situación que se percibe como amenazante o de demanda incrementada.

Síntoma provocado por alguna situación en problema, los síntomas son algunos notables como el nerviosismo (Temblar) o estar inquieto. Otros no son tan notables como la aceleración del corazón, que se ven reflejados en los datos captados y presentados, la sudoración, cambios en la temperatura corporal.

El estrés es una respuesta natural y necesaria para la supervivencia, a pesar de lo cual hoy en día se confunde con una patología. Esta confusión se debe a que este mecanismo de defensa puede acabar, bajo determinadas circunstancias frecuentes en ciertos modos de vida, desencadenando problemas graves de salud.



# Capítulo 6

## Discusión y Conclusiones





## 6.1 Discusión.

Al finalizar este estudio de “Evaluación de un Sistema de Interacción Física Hombre-Robot; con base al protocolo NASA TLX”, podemos decir, que a los participantes en este estudio si les genere cambios biológicos y físicos al realizar las tareas encomendadas con los dispositivos hápticos.

Sandra G. Hart (2006, págs. 904-908) dice “los resultados de los participantes pueden darse sin que ellos estén al tanto de todas las variables de la tarea a realizar o los procesos que subyacen en sus decisiones y acciones”; por lo tanto, se puede encontrar una distinción entre el nivel de carga de trabajo que el diseñador del sistema tiene la intención de imponer y las respuestas de un sistema Hombre-Máquina específicas para una tarea debido a la subjetividad de la experiencia de los participantes. Las experiencias fenomenológicas de los participantes afectan el comportamiento posterior, y por lo tanto afectan su rendimiento y las respuestas fisiológicas a una situación. Si los participantes consideran que el trabajo de carga de trabajo de la tarea fuera excesiva, incluso aunque las demandas de la tarea son objetivamente bajas, pueden adoptar estrategias apropiadas para una alta carga de trabajo de la situación (por ejemplo, vertimiento de tarea y responder rápidamente), la experiencia psicológica o angustia fisiológica, o adoptar un criterio más bajo para el rendimiento.

Para nuestro caso encontramos que los participantes jóvenes sanos de los Programas Educativos de Medicina, Odontología y Enfermería; presentaron cambios biológicos al finalizar la tarea asignada, como el cambio de temperatura corporal; así como cambios en su presión arterial en el 63% del total; de los participantes que contestaron que tienen experiencia en juegos de realidad virtual la presión arterial registro cambios. Mediante este estudio se puede concluir que los juegos de realidad virtual tienden a aumentar la presión arterial de los individuos que realizan este tipo de actividad.

En cuestión de género podemos decir, que el 70% de los participantes masculinos que tiene experiencia con juegos de realidad virtual presentó cambios en sus signos vitales mientras que en el caso de las mujeres el 50% de ellas registro cambios en su presión arterial, se puede inferir que en el caso de los participantes masculinos tiene mayor desarrollo en la motricidad fina debido a la práctica con instrumental estomatológico ya que la mayoría de estos pertenece al extractó del PE de Odontología.



Por otro lado, un elemento que no condiciona el óptimo desempeño en el desarrollo de la carga de trabajo con el participante fue el tiempo de ejecución en la tarea, debido a que todos los participantes la concluyeron.

Además se identificó que puede existir relación entre el estrés y la carga de trabajo que desarrollo el participante; así como dependiendo del PE del participante se puede identificar un estrés en el desarrollo de la tarea y el desempeño en la carga de trabajo con el dispositivo háptico. Esto debido a que los más estresados fueron los estudiantes de medicina, mientras que los estudiantes de enfermería obtuvieron una mejor calificación.

Del total de los participantes el 60% fueron mujeres y el 40% hombres, se identificó que el valor mínimo fue registrado por género para el caso de los hombres realizaron la actividad sin ninguna colisión y en un tiempo de 16.19 segundos en el caso de las mujeres encontramos que registraron como valor mínimo 5 colisiones en un tiempo de 10.26 segundos y esto puede ser porque los hombres tienen mejor espacio visual y recuerdan la trayectoria recorrida a diferencia de las mujeres que tienen una motricidad más fina en los miembros superiores.

Con respecto al medio ambiente, puede ser un factor que ocasiona que el desempeño de la carga de trabajo impuesta a los participantes no se concluyera, ninguno de los participantes refirió en que el ruido y el calor les genero incomodidad.

Dentro de la investigación y análisis de los datos identificamos que no existe un nivel de error del usuario en la tarea de navegación con guiado kinestésico con el dispositivo háptico Phanthom Omni a través del protocolo NASA TLX. Lo anterior debido a que el 65.8% de los participantes concluyeron la actividad de la carga de trabajo en el hipertubo y la circunferencia con una calificación de 10 y 9; realizaron la actividad independientemente de cómo se sintieron en el proceso para el resto que es el 34.1% concluyó la actividad con una calificación menor.

En los participantes el nivel de error con respecto a la carga de trabajo el 34.1% expresa que si le generó un grado de esfuerzo para cumplir con la actividad.



## 6.2 Conclusiones.

Con respecto a la evaluación de un Sistema de Interacción Física Hombre-Robot con base al protocolo NASA TLX; podemos decir, que el 40% de los participantes identificó una carga de trabajo; aún con ello todos los participantes realizaron la actividad de manera satisfactoria. Por lo anterior, se infiere que los participantes les genero estrés de una u otra manera en la realización de la carga de trabajo ya que presentaron una reacción fisiológica en el organismo en el que entran en juego diversos mecanismos de defensa para afrontar una situación que se percibe como amenazante o de demanda incrementada; además de la comprobación con los resultados obtenido a través del cuestionario NASA TLX que se les aplicó. Es decir el 40% de los participantes, les generó estrés al estar realizando la actividad que consistió en el uso de la realidad virtual y de un brazo robótico. *Esta información sirve para en un futuro diseñar Sistemas de Interacción Física Hombre-Robot con características que sean más ergonómicas para los usuarios.*

La justificación de dicho resultado, es la tendencia en el uso de sistemas robóticos acoplados total o parcialmente en el cuerpo humano, particularmente ante la presencia de discapacidad. El flujo de energía que permite validar la transmisión de conocimiento a través de canales kinestésicos, representa una variable muy relacionada con la demanda física y que implica efectos sobre el esfuerzo. La convergencia de movimiento del robot (posición y velocidad de consigna) está estrechamente relacionada con la demanda temporal y tiene efectos sobre el nivel de frustración en el desarrollo de la tarea. La demanda mental corresponde a las características de la tarea y su planificación. El rendimiento o desempeño general de la interfaz con el usuario en el lazo de control, corresponde a las mejores de estabilización y baja carga de trabajo. Sin embargo, en las condiciones que se diseñó la tarea de interacción, es evidente el alto nivel de estrés al que fue sometido. La discriminación de usuarios que efectuaron la tarea, fue gracias a la instrumentación de parámetros ambientales y de signos vitales; lo que permite garantizar mayor confiabilidad en el resultado obtenido.

Este trabajo de investigación se ha presentado en los siguientes foros:

- 3er Congreso Nacional en Tecnologías de la Información 2014, Ingeniería de Software; Sede: Escuela Superior de Tlahuelilpan, UAEH; 9, 10 y 11 de abril de 2014.
- Segundo Congreso Internacional de Educación Médica por Simulación 2014; Sede: Instituto de Ciencias de la Salud, UAEH; 25, 26 y 27 de Septiembre de 2014.
- Aceptación de un artículo en el “Boletín Electrónico del Instituto de Ciencias de la Salud” que será publicado en el mes de enero de 2015 y disponible en la URL <http://www.uaeh.edu.mx/scige/index.html>.
- Entrevista con “Garza Ciencia” el día 2 de julio de 2014; URL <http://www.garzaciencia.tv/protocolo-ciencia-06-brazo-robotico/>
- Entrevista en “Radio Universidad” el día 25 de septiembre de 2014 en el programa de “Sinergia”.
- Con fecha 26 de septiembre de 2014, recibí oficio de aceptación de artículo para publicación y conferencia en la 2da International Scientific Forum, ISF 2014 in “Vitrina” University, 11-13 December 2014 in Tirana, Albania.



## Referencias

1. Senn, James A. Análisis y Diseño de Sistemas de Información; McGraw-Hill 2da. Edición, Julio 1992.
2. Marakas, Jame A. O'Brien y George M. Sistemas de Información Gerencial; Mc Graw Hill, 2013.
3. Muñoz Cruz V. Gestión y planificación de sistemas y servicios de información. En García Gutiérrez AL. (ed) Introducción a la documentación información y periodística. Sevilla: Alcalá de Guadaira; 1998.
4. José Antonio J. Carrobes, La bioretroalimentación en la rehabilitación neuromuscular: revisión y estudio de casos, Revista Latinoamericana de Psicología, vol. 15, núm. 1-2, 1983, pp. 215-236, Fundación Universitaria Konrad Lorenz, Colombia
5. Steven L Wolf and Jiping He. Rehabilitation, Recent developments in biofeedback for neuromotor. He Huang1. 3:11 doi: 10.1186/1743-0003-3-11, 2006, Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation 2006.
6. Goertz, R. and R. Thomson. Electronically Controled Manipulator y Nucleonics. Pág. 46-47, 1954.
7. Sutherland I. The Ultimate Display, Prodedings of international Federation of Information Processing, 1965, págs. pág, 506-508.
8. Kilpatrick, P. The use of kinesthetic suplement in an interactive system, PhD, Thesis; Thesis, Computer Science Departament. University of North Carolina at Chapel, 1976.
9. Burdea G. C, J. Zhvang, E. Roskos, D. Silver and N. Langrano, A Portable. Dextrous Master with Force Precense- Teleoperator and Virtual Environments, Cambridge, MA: Vo 1, No1, MIT Press, 1992, pág. 18-27.
10. Hashimoto, H., M. Boss, Y. Kuni and F. Harashima. Intelligent Cooperative Manipulation System Using Dynamic Force Simulator, Proceedings of IEEE. New York, s.n., Mayo 1994. International Conference on Robotics and Automation, IEEE. pág. 2598-2603.
11. Ing. Alejandro Jarillo Silva, Ing. Iván Hernández Ángeles y Dr. Omar A. Domínguez Ramírez. PHANToM: una interfaz para retroalimentación kinestética, entrenamiento y teleoperación con propósitos de diagnóstico y rehabilitación médica. Pachuca, Hgo. s.n.
12. Vicente Parra-Vega y Omar A. Domínguez Ramírez. Haptic remote guided exploration of deformable objects. 10.1115/IMECE2003-43894., Vols. Paper No. IMECE2003-43894. Pág. 793-800.
13. G., Hart. S. Theory and measurement of human workload. In J. Zeidner. New York: Pág. 496-555. (Ed.) Human Productivity Enhancement, (1986).
14. Sheridan, T. B. and Stassen. H. Toward the definition and measurement of the mental workload of transport pilots. . Cambridge MA- MIT. (Final report DOT-OS-70055), (1979).

15. Hart, Sandra G. Development of NASA-TLX (Task Load Index); Results of Empirical and Theoretical Research. Aerospace Human Factors Research.
16. Dane Powell. The Task-Dependent Efficacy of Shared-Control Haptic Guidance Paradigms. Student Member, IEEE and Marcia K. OMalley. 2012, IEEE.
17. Powell, Dane. Implementation and Analysis of Shared-Control Guidance Paradigms for Improved Robot-Mediated Training. 2010.
18. Brooks, F.P. The Computer Scientist as Toolsmith-Studies in Interactive Computer Graphics. Proceedings of IFIP. Proceedings of IFIP 1977. pág. 625-634.
19. Shimoga, K.B. A Survey of Perceptual Feedback Issues in Dexterous Telemanipulation: Part II. Finger Touch Feedback, 1993. IEEE Annual Virtual Reality International Symposium, pág. 271-279.
20. John Wiley and Sons, Burdea G. C. Force and Touch Feedback for Virtual Reality. The State University of New Jersey, 1996. Electrical and Computer Engineering Department.
21. Hardware Installation and Technical Manual. SensAble Technologies, PHANTOM PREMIUM 1.0/1.5a, 3D Touch Components. Revisión 6.5, 18 August, 2000.
22. Alejandro Jarillo Silva, Vicente Parra-Vega y Omar Arturo Domínguez-Ramírez. PHANTOM OMNI Haptic Device: Kinematic and Manipulability; ISBN: 978-0-7695-3799-3 , 2009, Published in: CERMA '09 Proceedings of the 2009 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA 2009);, Vols. IEEE Computer Society Washington, DC, USA , Pág. 193-198.
23. Miller, Sarah. Literature Review Workload Measures. Iowa. ID N01-006, August.
24. Johanssen. G., Moray\ Pew. R. Rasmussen. J. Sanders\ k. Wickens, C. Final report of experimental psychology group. Mental Workload: Its Theory and Measurement. . New York. In N. Moray (Ed.), (1979), pág. 101-116.
25. Sheridan, T. B., and Stassen. H. Toward the definition and measurement of the mental workload of transport pilots. Cambridge MA- MIT. Final report DOT-OS-70055, 1979.
26. Ericsson, K. A. L Simon, H. A. Verbal reports as data. Psychological Review 87 (3). 1980, pág. 215-251.
27. Nisbett, R. E. & Wilson, T. D. Telling more than we can know: Verbal reports on mental processes. . Psychological Review, 84 (3). 1977, pág. 231-259.
28. Turksen, I. B. & y Moray, N. & Fuller, K. (in press). A linguistic rule-based expert system for mental workload. Toward the Factory of the Future. In H. J. Bullinger & H. J. Warnecke Rubio, S., Díaz, E., Martín, J., Puente, JM.
29. Evaluación de la carga mental subjetiva: Una comparación de SWAT, NASA-TLX y métodos de perfil de carga de trabajo. Volumen 1, 2004, Psicología Aplicada: Una Revisión Internacional, Vol. 53, pág. 63-86.

30. Alex CAo, Kesh Av K. Chint Am Ani, Abhil Ash K. Pandya and R. Darinellis NASA TLX: Software for assessing subjective mental workload. Vol. 1, 2009, Behavior Research Methods, Vol. 41, pág. 113-117.
31. Cabrero-García, J., Richart-Martínez, M. Apuntes de Metodología de la Investigación I. España: Universidad de Alicante. , 2000.
32. Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., Baptista-Lucio, P. Metodología de la investigación. México; Ed. McGraw-Hill Interamericana, 4ª Ed., 2006.
33. Coolican, H. Métodos de Investigación y Estadística en Psicología. México: Ed. Manual Moderno. 3ª Ed. 2005.
34. Wales, J., Sanger, L. Estadística inferencial. USA, Enciclopedia metodológica., 2001.
35. W. Daniel Wayne. Bioestadística. España. Ed. Limusa; Cuarta Ed. pág. 181, 2005.
36. Federación, H. Congreso de la. Ley General de Salud; Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la Salud. Diario Oficial de la Federación. 1984.
37. Omar Arturo Domínguez Ramírez, Alejandro Jarillo Silva, Vicente Parra Vega, Francisco J. Ruiz-Sánchez y Gabriel Sepúlveda Cervantes. Neurorehabilitación robótica basada en guiado kinestésico local para miembro superior con movimiento involuntario. ISSN 1665-5427, 2011, Revista Ciencia Universitaria UAEH. .
38. Laboratorio de Hápticas Avanzada; dirigido por D. en C. Omar A. Domínguez Ramírez en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería en el Centro de Información de Tecnologías e Información de Sistemas, año 2014; Pachuca, Hgo. México.
39. José Manuel, Fernández Ramírez. Tesis Guiado háptico pasivo y estudios de interacción Hombre-Robot empleando estrategias de control adaptable PID WAVENET. Mineral de la Reforma, Hgo. México. UAEH-Conacyt, 2014.
40. How to measure heart rate Vogel CU, Wolpert C y Wehling M. 2004, European Journal of Clinical Pharmacology, Vol. 60, pág. 461–466.
41. Greiner, Walter, Neise, Ludwig y Stöcker, Horst. Thermodynamics and Statistical Mechanics. Springer. ISBN 0-3-87-94299-8., 1997.
42. Sciavicco, L. and B. Siciliano. Modelling and Control of Robot Manipulators. Springer-Verlag. Second Edition, 2000.
43. Tan, H.Z., Srinivasan, M. A., Eberman, B. and Cheng, B. Dynamic System and Control, Vol. 1. Human Factors for the Design of Force-Reecting Haptic Interfaces: Ed: C.J. Radclike, DSC-Vol.55-1, 1994, pág. 353-359.
44. Iman Mohammad Rezazadeh, Mohammad Firoozabadi, Huosheng Hu. Co-Adaptive and Affective Human-Machine Interface for Improving Training Performances of Virtual Myoelectric Forearm Prosthesis. Affective Computing, Julio-septiembre 2012, Senior Member, IEEE, and S. Mohammad Reza Hashemi Golpayegani, Vols. IEEE Transactions on (Vol. 3), pág. 285-297.
45. Manual NASA. Nasa Task Load Index (TLX) v 1.0. 1986.

46. Hart, S., y Staveland, Hancock y N. Desarrollo de la NASA-TLX (Task Load Index): Los resultados de la investigación empírica y teórica carga mental humano. 1988, Meshkati Amsterdam: North Holland. (pág. 139-183).
47. Hart, S. Índice de carga Nasa-Task (NASA-TLX), 20 años después. Factores Humanos y Ergonomía Sociedad. Actas de la Reunión Anual, Vol. Actas de la Reunión Anual, pág. 904-908. (2006).
48. Han. S. G., Childress. M. E., k Hauser, J. R. Proceedings of the 1982 Psychology in the DOD Symposium. Individual definitions of the term "workload". . US. AFA. C.O. 1982, pág. 478-485.
49. G., Hauser. J. R. Childress. M. E. t Hart. S. Manual Conference on Manual Control. (F\VAL-TR-83-3021) Wright-Patterson. Rating consistency and component salience in subjective workload estimation. Proceedings of the IFth. Mr Force Base. OH, 1983, pág. 127-132.
50. Rasmussen, J. IEEE Systems, Man, and Cybernetics. Skills, rules, and knowledge; Signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. . New York. Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1983, pág. 257-266.
51. White, S. A., McKinnon, D. P., & Lyman. J. (in press). Modified petri net sensitivity to workload manipulations. Proceedings of the 21st .Annual Conference on Manual Control. Columbus. OH. Ohio State University.
52. José Andrés Turiján, José Francisco Ruiz Sánchez y Omar Arturo Domínguez Ramírez. Tesis "Plataforma de neurorehabilitación de miembro superior por guiado háptico para pacientes pediátricos con discapacidad motriz". Ramos Arizpe, Coahuila. Ed. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Diciembre de 2012.
53. Ing. Rafael Franco Jaen, Dr. Omar Arturo Domínguez Ramírez, Dr. Julio Cesar Ramos Fernández y Dr. Luis Enrique Ramos Velasco. Tesis "Estrategias de evaluación en el desempeño de un sistema de interacción hombre-robot. Zempoala, Hgo. México. Universidad Politécnica de Pachuca, Posgrado de Maestría en Mecatrónica. Agosto 2013.
54. Alejandro Jarillo Silva, Ing. Iván Hernández Ángeles y Dr. Omar A. Domínguez Ramírez. PHANToM: una interfaz para retroalimentación kinestética, entrenamiento y teleoperación con propósitos de diagnóstico y rehabilitación médica. 2013, CINVESTAV, México.



## Glosario de términos

**Dispositivo háptico:** es conjunto de interfaces tecnológicas que interaccionan con el ser humano mediante el sentido del tacto. Los dispositivos hápticos de realimentación de fuerzas, permiten que los usuarios toquen y manipulen objetos virtuales, creando el efecto de textura, colisión, elasticidad; cuando se trabaja sobre modelos 3D [43].

**Efactor:** mecanismo de para ejecutar respuestas. <http://es.wikipedia.org/>

**Fricción Dinámica:** es la que existe cuando el objeto ya se encuentra en movimiento (en este caso hay movimiento relativo entre dos superficies).

**Fricción estática:** es la que impide que un cuerpo comience a moverse (la velocidad relativa entre las dos superficies es cero).

**Fuerza de fricción:** es la fuerza que se opone a que un cuerpo se desplace al estar en contacto con otro. La fricción se origina en el hecho de las superficies no suelen ser perfectamente lisas, por lo que las irregularidades que existen en las superficies impedirán que las superficies se desplacen libremente entre sí.

**Hemiplejia:** es un trastorno del cuerpo del paciente en el que la mitad contralateral de su cuerpo está paralizada. Es normalmente el resultado de un accidente cerebrovascular. La parálisis cerebral también puede afectar un solo hemisferio, resultando en una limitación de funciones. Esto no causa parálisis necesariamente pero sí espasmos. La parálisis cerebral en la que éste sea el único síntoma también puede denominarse hemiplejia. Bobath B. Hemiplejía del adulto. Evaluación y tratamiento. Ed. Médica Panamericana (3ª edición) 1993.

**Háptica:** se designa la ciencia del tacto, por analogía con la acústica (oído) y la óptica (vista), proviene del griego háptō (tocar, relativo al tacto). Algunos teóricos como Herbert Read han extendido el significado de la palabra 'háptica', refiriéndose por exclusión a todo el conjunto de sensaciones no visuales y no auditivas.

**Método:** (del griego οδός odos, significa "camino o vía") es el procedimiento utilizado para llegar a un fin. Su significado original señala el camino que conduce



a un lugar. Las investigaciones científicas se rigen por el llamado método científico, basado en la observación y la experimentación, la recopilación de datos, la comprobación de las hipótesis de partida.

**Percepción háptica o percepción táctil:** es el resultado de una cadena de eventos que inician con un estímulo aplicado al cuerpo, como calor, presión, o vibración. Dependiendo del tipo, magnitud y lugar de la piel, este estímulo activa una respuesta de receptores especializados (termorreceptores, mecanorreceptores y nocioreceptores).

**Percepción humana:** es la habilidad humana para percibir las propiedades de los objetos como forma, textura y suavidad, y es medida con equipo computacional controlado y métodos psicofísicos [44].

**Planeación de trayectoria:** es generar las referencias de entrada del sistema de control de movimiento, el cual asegura que el manipulador ejecuta las trayectorias de planeación. Planeando consiste en generar un tiempo de secuencia de los valores obtenidos por una función polinomial interpolando la trayectoria deseada [43].

**Protocolo:** Uno o un conjunto de procedimientos destinados a estandarizar un comportamiento humano o sistemático artificial frente a una situación específica.

**Robótica:** es la rama de la tecnología que se dedica al diseño, construcción, operación, disposición estructural, manufactura y aplicación de los robots. La robótica combina diversas disciplinas como son: la mecánica, la electrónica, la informática, la inteligencia artificial, la ingeniería de control y la física. Para este experimento hablamos de Robots de 3er Generación es decir, Robots con control sensorizado. El controlador es una computadora que ejecuta las órdenes de un programa y las envía al manipulador para que realice los movimientos necesarios.

**Kinestésico:** es el aprendizaje a través del cuerpo en movimiento, la percepción interna del mismo y la posibilidad de cambio a partir del “Darse Cuenta” (Awariness). Esta vivencia permite resignificar y sensibilizar nuestra experiencia y registro del cuerpo: la actitud postural, la manera de movernos y las múltiples características corporales inscriptas y automatizadas. Jean Le Boulch, en su libro “Hacia una ciencia del movimiento humano”, aclara: “Para que dicha concientización sea posible, es necesario que el sujeto en situación de aprendizaje

tenga alguna representación mental o imagen del movimiento a realizar. Cuando se realiza la adecuación entre la imagen del movimiento y las sensaciones kinestésicas que resultan de su ejecución, podemos decir que el modelo ha sido internalizado”.



## Apéndice A: "Hoja técnica de los elementos de un dispositivo háptico"

### Phantom Omni.



#### Características destacadas

- Certificado por la CE
- Seis grado de libertad de detección posicional
- Diseño portátil y tamaño compacto para la flexibilidad del lugar de trabajo
- Cómodo lápiz de goma moldeada con pintura texturizada para uso a largo plazo y un agarre seguro
- Lápiz óptico extraíble para la personalización del usuario final
- Dos interruptores momentáneos integrados en el lápiz para la facilidad de uso y personalización del usuario final
- Espacio de trabajo compacto para la facilidad de uso
- Construido de los componentes metálicos y plásticos moldeados por inyección
- Tintero Stylus-docking para la calibración automática del espacio de trabajo

#### Phantom Omni especificaciones técnicas

Características	Aspectos técnicos
Force feedback espacio de trabajo	~ 6.4 W x 4.8 alto x 2.8 D de > 160 W x 120 H x 70 mm D
Huella (base del dispositivo área física ocupa en el escritorio)	6 5/8 W x 8 D en ~ 168 W x 203 mm D
Peso (sólo dispositivo)	3 libras 15 oz
El rango de movimiento	Movimiento de la mano girando la muñeca
Resolución nominal de la posición	> 450 dpi ~ 0,055 mm
Fricción backdrive	<1 oz (0,26 N)
La fuerza que puede ejercer máxima a nominal (brazos ortogonales) posición	0,75 lbf (3.3 N)
La fuerza que puede ejercer continua (24 horas) Rigidez	> 0,2 lbf (0,88 N) Eje X> 7.3 lbs / in (1,26 N / mm) del eje Y> 13,4 libras / en el (2,31 N / mm) del eje Z> 5,9 libras / pulg (1,02 N / mm)
Momento de inercia (masa aparente en la punta)	~ 0.101 lbm (45 g)
Force feedback	x, y, z
Detección de posiciones [stylus cardán]	x, y, z (codificadores digitales) [cabeceo, balanceo, guiñada ( $\pm$ 5% potenciómetros linealidad)
Interfaz	IEEE-1394 FireWire® de puerto: 6 pines a 6 pines
Plataformas compatibles	PC basados en Intel o AMD
Openhaptics compatibilidad toolkit®	Sí
Aplicaciones	Típos seleccionados de Haptic Research, sistema FreeForm Modeling®™, ClayTools™ sistema

## Apéndice B: "Tabla de definición de variables".

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Escala	Indicador
Demanda mental	El participante dará su respuesta en valores de la escala.	Son los valores que darán los participantes en el experimento al responder la encuesta.	Ordinal	Escala del 5 al 100
Demanda física	El participante dará su respuesta en valores de la escala.	Son los valores que darán los participantes en el experimento al responder la encuesta.	Ordinal	Escala del 5 al 100
Demanda temporal	El participante dará su respuesta en valores de la escala.	Son los valores que darán los participantes en el experimento al responder la encuesta.	Ordinal	Escala del 5 al 100
Esfuerzo	El participante dará su respuesta en valores de la escala.	Son los valores que darán los participantes en el experimento al responder la encuesta.	Ordinal	Escala del 5 al 100
Frustración	El participante dará su respuesta en valores de la escala.	Son los valores que darán los participantes en el experimento al responder la encuesta.	Ordinal	Escala del 5 al 100
Rendimiento	El participante dará su respuesta en valores de la escala.	Son los valores que darán los participantes en el experimento al responder la encuesta.	Ordinal	Escala del 5 al 100
Medio ambiente	Se tomará lectura de los monitores por participante.	Son los valores que emitirá el equipo instalado cuando el participante este realizando el experimento.	Ordinal	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Luminosidad.</li> <li>2. Temperatura.</li> <li>3. Ruido</li> <li>4. Humedad en el ambiente.</li> </ol>

## Tabla de Variables Complementarias.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Escala	Indicador
<b>Temperatura_Inicial Complementaria</b>	Temperatura corporal del cuerpo del participante	Número que identifica los grados de temperatura corporal	Continua	Grados Centígrados
<b>Presión Arterial_Inicial Complementaria</b>	Presión arterial inicial del participante	Números que identifica la presión arterial	Nominal	1. Normal 2. Alta 3. Baja
<b>Frecuencia Cardiaca_Inicial Complementaria</b>	Frecuencia cardiaca inicial del participante	Número que identifica la frecuencia cardiaca	Continua	Frecuencia cardiaca
<b>Peso Complementaria</b>	Peso(masa corporal del participante)	Número de peso en kilogramos del participante	Continua	Peso en Kilogramos
<b>Temperatura_Final Complementaria</b>	Temperatura corporal del cuerpo del participante	Número que identifica los grados de temperatura corporal	Continua	Grados Centígrados
<b>Presión Arterial_Final Complementaria</b>	Presión arterial del participante	Números que identifica la presión arterial	Nominal	1. Normal 2. Alta 3. Baja
<b>Frecuencia Cardiaca_Final Complementaria</b>	Frecuencia cardiaca del participante	Número que identifica la frecuencia cardiaca	Continua	Frecuencia cardiaca
<b>Tiempo Experimento Complementaria</b>	Tiempo que se llevó el participante para realizar el experimento	Número	Continua	Tiempo
<b>Edad Complementaria</b>	Tiempo que ha vivido una persona	Número de años cumplido	Continua	Dato edad
<b>Sexo Complementaria</b>	Condición orgánica de género	Característica fenotípica del participante	Nominal	1. Femenino 2. Masculino
<b>Estado civil Complementaria</b>	Situación conyugal del trabajador	El expresado por el participante	Nominal	1. Soltero 2. Casado 3. Divorciado 4. Unión libre 5. Viudo (a)

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Escala	Indicador
<b>Escolaridad Complementaria</b>	Tiempo que estudio el participante	El expresado por el participante	Ordinal	1. Nivel básico 2. Bachillerato 3. Licenciatura 4. Maestría 5. Doctorado
<b>Ocupación Complementaria</b>	Actividad a la que se dedica el participante	El expresado por el participante	Ordinal	1. Estudiante 2. Profesor 3. Servidor Publico 4. No Trabaja 5. Otro:
<b>Donde nació Estado Complementaria</b>	Entidad federativa donde nació el participante	El expresado por el participante	Continua	Nombre de la Entidad Federativa
<b>Donde nació Municipio Complementaria</b>	Municipio de la Entidad federativa donde nació el participante	El expresado por el participante	Continua	Nombre del Municipio
<b>Donde nació Localidad Complementaria</b>	Localidad del Municipio de la Entidad federativa donde nació el participante	El expresado por el participante	Continua	Nombre de la Localidad
<b>Experiencia en los juegos de realidad virtual</b>	El participante contestará si tiene experiencia	El expresado por el participante	Ordinaria	1. Si 2. No
<b>Tiene discapacidad física</b>	El participante contestará si padece alguna discapacidad física.	El expresado por el participante	Ordinaria	1. Si 2. No
<b>Tipo de discapacidad</b>	El participante contestará si fuera el caso el tipo de discapacidad física que padece.	El expresado por el participante	Ordinaria	1. Miembro superior 2. Miembro inferior. 3. Una extremidad. 4. Dos extremidades.



## Apéndice C: “Cuestionario basado en el protocolo NASA TLX”



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**  
**INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA SALUD**  
*Evaluación de una Interfaz Hombre - Robot basado en el Protocolo NASA TLX*

En este trabajo de investigación y desarrollo tecnológico, se propone evaluar una interfaz Hombre-Robot con base en la carga de trabajo en la interacción, utilizando el protocolo NASA TLX versión ampliada a partir de indicadores de esfuerzo, frustración, carga mental, carga temporal y estrés y la cuantificación de parámetros ambientales como temperatura, humedad relativa y nivel de iluminación en el área de trabajo.

Solicitamos su valiosa participación contestando las siguientes preguntas referentes al tema. Desde este momento agradecemos su colaboración.

**INDICACIONES.** Más adelante, encontrará preguntas que nos permitirán identificar algunas de sus percepciones durante su actividad en el guiado háptico Phantom Omni.

Folio:

--	--	--

Fecha:

--

**I. DATOS BIOLÓGICOS:**

Al inicio de que realicen la tarea de navegación con guiado kinestésico, a través de las funciones que realiza el dispositivo Phanthom Omni.

<b>Temperatura</b>	<b>Presión Arterial</b>	<b>Frecuencia cardíaca</b>	<b>Peso</b>
--------------------	-------------------------	----------------------------	-------------

1. Normal
2. Alta
3. Baja

Al finalizar el guiado kinestésico.

<b>Temperatura</b>	<b>Presión Arterial</b>	<b>Frecuencia cardíaca</b>
--------------------	-------------------------	----------------------------

1. Normal
2. Alta
3. Baja

**II. DATOS GENERALES**

<b>Tiempo Experimento:</b>	
----------------------------	--

	Codificación
1. Edad:	
2. Sexo: 1) Masculino 2) Femenino	
3. Estado civil: 1) Soltero 2) Unión libre 3) Casado 4) Divorciado 5) Viudo	
4. Escolaridad: 1) Nivel básico 2) Bachillerato 3) Licenciatura 4) Maestría 5) Doctorado	
5. Ocupación: 1) Estudiante 2) Profesor 3) Servidor Público 4) No trabaja 5) Otro:	
6. Programa Educativo: 1) Medicina 2) Odontología 3) Enfermería 4) Psicología 5) Nutrición 6) Farmacia 7) Gerontología	
7. Donde nació: 1) Estado: 2) Municipio: 3) Localidad:	
8. ¿Tiene experiencia con juegos de realidad virtual? 1) Si 2) No	
9. Tiene discapacidad física: (Su respuesta es No, pase al apartado III) 1) Si 2) No	
10. Tipo de discapacidad: 1) Miembro Superior 2) Miembro Inferior 3) Una extremidad d) Dos extremidades	





**III. NASA TLX**

Valores que maneja el Protocolo NASA TLX es de 5 a 100; por lo tanto el valor que anotará será el que más se acerque a la actividad realizada.

**Demanda Mental**

Ítems	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
1. ¿La tarea que realizó fue difícil?																					
2. ¿La tarea que realizó, requirió de un grado de esfuerzo mental?																					
3. ¿La tarea que realizó fue en un espacio cómodo?																					
4. En la realización de la tarea, ¿se distrajo por el ruido externo?																					

Bajo

Alto

**Demanda Físicas**

Ítems	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
1. ¿Qué grado de esfuerzo físico le requirió la realización de la tarea?																					
2. ¿Al realizar la tarea, sus miembros superiores fueron libres?																					
3. ¿Realizar la tarea, le genero alguna molestia musculo esquelética?																					
4. ¿Realizó los movimientos necesarios para completar la tarea?																					

Bajo

Alto

**Demanda Temporal**

Ítems	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
1. ¿Al realizar la tarea se sintió con estrés?																					
2. ¿La realización de la tarea, le impuso rapidez?																					
3. ¿La información que recibió, para realizar la tarea fue clara?																					
4. ¿Al realizar la tarea, le generó habilidad y destreza?																					

Bajo

Alto

**Esfuerzo**

Ítems	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
1. ¿Al realizar la tarea, fue difícil mentalmente?																					
2. ¿Al concluir la tarea, fue difícil físicamente?																					
3. ¿Qué nivel de atención mental presentó en la realización de la tarea?																					
4. ¿Durante la tarea, se sintió activo?																					

Bajo

Alto

**Frustración**

Ítems	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
1. ¿En la realización de la tarea, se sintió con tensión?																					
2. ¿La realización de la tarea le generó molestia?																					
3. ¿Al concluir la tarea, se sintió complacido?																					
4. ¿Al realizar la tarea, se sintió con nerviosismo?																					

Bajo

Alto

**Rendimiento o "Performance"**

Ítems	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
1. ¿La tarea fue repetitiva y de corta duración?																					
2. ¿El método utilizado para realizar la tarea fue claro?																					
3. ¿La planificación de la tarea fue adecuada?																					
4. ¿Durante la tarea, mantuvo una conversación con el instructor?																					

Alto

Bajo

**IV. MEDIO AMBIENTE**

Ítems	Valores
1. Nivel de Luz:	
2. Nivel de temperatura:	
3. Nivel de Ruido en el Ambiente:	
4. Nivel de humedad en el ambiente:	



## Apéndice D: “Consentimiento Informado”



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**  
**INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA SALUD**

Folio 

--	--	--

**HOJA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO**

**INVESTIGACIÓN: Evaluación de una Interfaz Hombre - Robot basado en el Protocolo NASA TLX**

Usted ha sido invitado a participar de manera voluntaria en esta investigación cuyo objetivo es identificar y cuantificar a través del protocolo NASA TLX en versión ampliada la evaluación subjetiva y multidimensional de la tasa de carga de trabajo en sus dos dimensiones: demandas solicitadas a las personas (mentales, físicas y temporales) y la interacción de la persona con la tarea (esfuerzo, frustración y rendimiento) además de los parámetros ambientales como temperatura, humedad relativa y nivel de iluminación en el área de trabajo, a través de una tarea de navegación en un ambiente virtual dinámico tridimensional.

Usted fue seleccionado para participar en ésta investigación debido a que cubre con las características de la investigación, es una persona sana, que no cuenta con ninguna discapacidad motriz y además forma parte de la población Universitaria.

Si acepta participar en esta investigación se le solicitará, realizar la tarea de navegación con guiado kinestésico local para un miembro superior que contempla 5 fases:

1. Capacitación y en este apartado se va a medir el tiempo utilizado por el usuario.
2. Entorno virtual háptico activo, el usuario controla el dispositivo Phantom Omni.
3. Entorno virtual háptico pasivo, el usuario realizará el guiado háptico a través de las funciones que realiza el dispositivo Phantom Omni.
4. El usuario realizará la actividad virtual háptico activo, el usuario controla el dispositivo Phantom Omni.
5. El Usuario contestará la encuesta de "Evaluación de una Interfaz Hombre - Robot basado en el Protocolo NASA TLX"

El participar en este estudio le tomará aproximadamente media hora.

La identidad del participante será protegida, ya que no escribirá su nombre en el cuestionario y solo será leído por el investigador con el fin de obtener datos estadísticos. Toda información o datos que pueda identificar al participante serán manejados confidencialmente. Solamente el investigador tendrá acceso a los datos que puedan identificar directa o indirectamente a un participante, incluyendo esta hoja de consentimiento.

Si ha leído este documento y ha decidido participar, no omito comentarle que su participación es completamente voluntaria y que usted tiene derecho de abstenerse de participar o retirarse del estudio en cualquier momento, sin ninguna penalidad, también tiene derecho a no contestar alguna pregunta en particular.

Si tiene alguna pregunta o desea más información sobre esta investigación, por favor hágasela a la persona que le está presentando este documento.

Su forma en este documento significa que ha decidido participar después de haber leído y discutido la información presentada en esta hoja de consentimiento

Nombre del participante	Firma	Fecha
_____	_____	_____

He discutido el contenido de esta hoja de consentimiento con el arriba firmante, le he explicado los riesgos y beneficios del estudio

Nombre del investigador o persona Designada	Firma	Fecha
_____	_____	_____



Apéndice E: "Oficio de Comité de Ética e Investigación"



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO  
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA SALUD  
COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN



Cinw/019/2014

MTRA. ROSARIO BARRERA GÁLVEZ  
PROFESORA ADSCRITA AL  
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA SALUD  
PRESENTE

Por este medio, en mi calidad de Presidente del Comité de Ética e Investigación, me permito informarle que se ha revisado el Proyecto titulado: *Evaluación de una Interfaz Hombre - Robot con Base en el Protocolo NASA TLX* que fue registrado en la Coordinación de Investigación con el No. de Folio: 006, y se le ha otorgado el dictamen de: **APROBADO CON MODIFICACIONES SUGERIDAS.**

El dictamen antes señalado implica que se realicen los ajustes correspondientes y que a más tardar el día 11 de marzo del año en curso lo entregue para una segunda revisión por parte del Comité de Ética e Investigación, a la Coordinadora de Investigación Dra. Rebeca Guzmán Saldaña (ver documento anexo).

Sin más por el momento, quedo de usted, y le envío un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"**  
San Agustín Tlaxiaca Hidalgo, a 25 de febrero de 2014.

MC. Esp. JOSÉ MARÍA BUSTO VILLARREAL  
DIRECTOR DEL ICsA  
PRESIDENTE DEL COMITÉ DE ÉTICA E INVESTIGACIÓN



*Rebeca Guzmán Saldaña*  
DRA. REBECA GUZMÁN SALDAÑA  
COORDINADORA DE INVESTIGACIÓN

JMBV/rgs

*Recibí  
27/feb/2014  
F. J.*

En el cincuentenario de la Autonomía Universitaria, ICsSa edifica en valores:  
VALOR: HUMILDAD - ANTIVALOR: Orgullo  
"Reconocer que mis logros se deben también a otras personas que han invertido en mi vida.  
Reconocer el valor de cada persona".

EX HACIENDA LA CONCEPCION SAN CARRETERA PACHUCA - ACTOHPM. TEL. 7112000 EXT. 4391

## Apéndice F. “Espacio de trabajo de la circunferencia”.

Plantillas utilizadas para realizar la tarea de una circunferencia en una superficie plana; se puede observar que la tarea parte del centro de la circunferencia con dirección en sentido de las manecillas del reloj.

Figura inicial en el experimento.

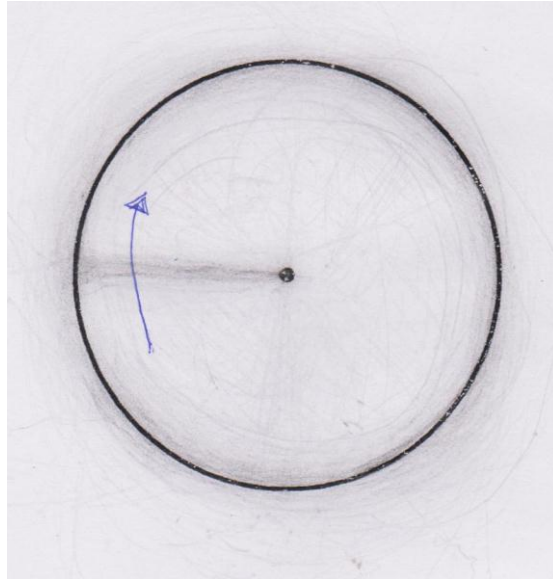


Figura que se utilizó como segunda opción

