

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS



**MODELO PARA EL DISEÑO DE AMBIENTES VIRTUALES DE
REHABILITACIÓN MOTRIZ DE EXTREMIDADES SUPERIORES
DE PACIENTES CON ENFERMEDAD CEREBROVASCULAR**

T E S I S

que presenta para obtener el grado de DOCTOR EN CIENCIAS

Cristina Ramírez Fernández

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. ALBERTO LEOPOLDO MORÁN Y SOLARES**

**CO-DIRECTORA DE TESIS:
DRA. ELOÍSA DEL CARMEN GARCÍA CANSECO**

ENSENADA, B. C.

ENERO DE 2017



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS
Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

**Modelo para el diseño de ambientes virtuales de rehabilitación
motriz de extremidades superiores de pacientes con
enfermedad cerebrovascular**

Tesis que para obtener el grado de Doctor en Ciencias presenta

Cristina Ramírez Fernández

Aprobada por el siguiente comité

Dr. Alberto Leopoldo Morán y
Solares

Director del Comité

Dra. Eloísa del Carmen García
Canseco

Codirector del Comité

Dr. Felipe Orihuela Espina

Miembro del Comité

Dra. Marcela Deyanira Rodríguez
Urrea

Miembro del Comité

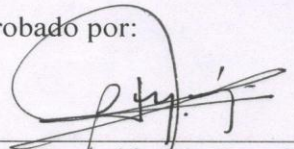
Dr. Gabriel Sepúlveda Cervantes
Miembro del Comité

Ensenada, Baja California, 13 de enero de 2017

RESUMEN de la Tesis de **Cristina Ramírez Fernández**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN CIENCIAS. Ensenada, Baja California, México. Enero de 2017.

**MODELO PARA EL DISEÑO DE AMBIENTES VIRTUALES DE
REHABILITACIÓN MOTRIZ DE EXTREMIDADES SUPERIORES DE PACIENTES
CON ENFERMEDAD CEREBROVASCULAR**

Resumen aprobado por:


Dr. Alberto Leopoldo Morán y Solares
Director de tesis


Dra. Eloísa del Carmen García Canseco
Co-Directora de tesis

Hoy en día, los desarrolladores de software se enfrentan al reto de crear entornos de simulación centrados en el usuario para la ejecución de tareas en tiempo real que apoyen las actividades de terapia de rehabilitación motriz. Estos entornos, conocidos como ambientes virtuales (AVs), se convierten en una herramienta de medición objetiva, con validez terapéutica para los especialistas en rehabilitación y sus pacientes, p. ej. sobrevivientes de enfermedad cerebrovascular (ECV).

Para el diseño de los AVs, los desarrolladores de software pueden basarse en diferentes recomendaciones de diseño y guías del dominio clínico reportadas en la literatura. Sin embargo, la heterogeneidad de estas recomendaciones dificulta su entendimiento afectando el proceso de diseño de los AVs. Por ello, los desarrolladores de software requieren considerar la disparidad de las recomendaciones con el fin de incrementar la validez clínica de los AVs. No obstante, existe aún una brecha entre la fase de diseño de los AVs y su validez en el dominio de rehabilitación motriz.

La contribución principal de esta tesis es una ontología llamada VEULMoR (*Virtual Environment for Upper Limb Motor Rehabilitation*), que es un modelo conformado por un conjunto de factores para el diseño de AVs de rehabilitación motriz de extremidades superiores de pacientes con ECV. Los factores de diseño del modelo se identificaron a partir de un estudio de contexto realizado en un centro de rehabilitación, el análisis de guías para la rehabilitación motriz, principios de aprendizaje motriz y principios de neuroplasticidad identificados en la literatura.

La validación del modelo se hizo en dos pasos. El primer paso se realizó mediante una evaluación con especialistas en rehabilitación y desarrolladores de software para determinar la importancia del contenido y estructura, así como la usabilidad, utilidad e intención de uso de la ontología. El segundo paso se realizó por medio de una evaluación con desarrolladores de software para determinar la usabilidad y utilidad de la ontología para la generación de instancias de AVs.

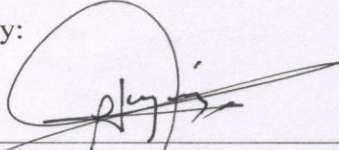
Los resultados de esta validación, muestran evidencia de una alta intención de uso, usabilidad, utilidad e importancia de su contenido. Además, proporcionan evidencia de que su uso facilita el proceso de diseño e incrementa la posibilidad de incluir factores clave en el diseño los AVs.

Palabras clave: Rehabilitación motriz, Enfermedad Cerebrovascular, Diseño, Ambiente Virtual.

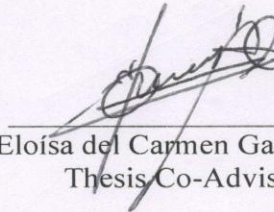
ABSTRACT of the thesis, presented by **Cristina Ramírez Fernández**, in order to obtain the DOCTOR OF SCIENCE. Ensenada, Baja California, México. January, 2017.

**DESIGN MODEL OF VIRTUAL ENVIRONMENTS FOR UPPER LIMB MOTOR
REHABILITATION OF STROKE PATIENTS**

Approved by:



Dr. Alberto Leopoldo Morán y Solares
Thesis Advisor



Dra. Eloísa del Carmen García Canseco
Thesis Co-Advisor

Nowadays, software developers are faced with the challenge of creating user-centric simulation environments for the execution of real-time tasks that support motor rehabilitation therapy activities. These environments, known as virtual environments (VEs), are becoming an objective measurement tool with therapeutic validity for rehabilitation specialists and their patients, e.g. stroke patients.

For the design of VEs, software developers rely on different design recommendations and clinical domain guides reported in the literature. Nevertheless, the heterogeneity of the recommendations hinders their understanding, affecting the design process of the VEs. Therefore, software developers need to take into account the disparity of the recommendations in order to increase the clinical validity of the VEs. However, there is still a gap between the design phase of the VEs and their validity in the motor rehabilitation domain.

The main contribution of this thesis is an ontology called VEULMoR (Virtual Environment for Upper Limb Motor Rehabilitation), which is a model conformed by a set of factors for the design of VEs for upper limb motor rehabilitation of stroke patients. The factors of the design model were identified from a context study performed in a rehabilitation center, the analysis of motor rehabilitation guidelines, motor learning principles and neuroplasticity principles identified in the literature.

The validation of the model was two-fold. The first step was conducted through an evaluation with rehabilitation specialists and software developers to determine the importance of its contents and structure, as well as the usefulness, usability and intention of use of the ontology. The second step was conducted through an evaluation with software developers to determine the usability and usefulness of the ontology to design instances of the VEs.

Validation results provide evidence of a high intention of use, usability, usefulness and importance of its content. Also, they provide evidence that its use facilitates the design process of VEs and increases the possibility of including key factors during their design.

Keywords: Motor Rehabilitation, Stroke, Design, Virtual Environment.

Dedicatoria

A mis padres, Sra. Elena Fernández Baladez y Sr. José de Jesús Ramírez Vázquez †.

A mi familia y amigos.

A mis asesores.

Agradecimientos

A Dios que con su fuerza y amor logré terminar este trabajo.

A mis asesores, Dr. Alberto Leopoldo Morán y Solares y Dra. Eloísa del Carmen García Canseco, quienes vivieron cada uno de mis tropiezos y a pesar de ellos, siempre estuvieron dispuestos a alentarme y enseñarme que con esfuerzo, disciplina y amor las cosas se pueden lograr. Los logros de esta investigación son principalmente de nosotros tres, no hay palabras suficientes para agradecerles.

A todos los miembros de mi comité de tesis, Dr. Felipe Orihuela Espina, Dra. Marcela Deyanira Rodríguez Urrea y Dr. Gabriel Sepúlveda Cervantes, quienes con sus comentarios y conocimientos enriquecieron cada producto resultante de este trabajo de investigación.

A mis padres, Sra. Elena Fernández Baladez y Sr. José de Jesús Ramírez Vázquez †, quienes me dieron la vida, son mi fuerza y me acompañan en mente, corazón y espíritu. Sabias sus palabras: “donde te la pongan la brincas”, “respira profundo”, “tu puedes mi cachita”, “no entiendo qué me dices, pero tú puedes hija”, etc.

A toda mi familia porque su amor, comprensión y ayuda fueron fundamentales para terminar esta meta.

A Christian quien llegó cuando más le necesitaba y siempre estuvo al pendiente de hacer más sencillo este proceso.

A Claudia Mariana quien siempre me escucha y aconseja. Te admiro, me has enseñado que con hechos se le demuestra a un amigo que se le quiere. Mis respetos Morris.

A Yigli que siempre está presente a pesar de la distancia, te quiero mucho topo.

A mis grandes amigos y personas hermosas que han contribuido para alcanzar esta meta, en particular a Chemita, Benji, Gloria, Dra. Corazón, Iria, Conchita, Lore, y Delia.

A mis compañeros y amigos del posgrado Ana, Edgar, Iván, Gilberto con los cuales disfruté la estancia en la Universidad.

A Rocky que es callado, tímido, inocente y que tiene la mirada, a mi Vaca y a la sentida de Róbin. También a Nina y Batman, espero que se encuentren muy bien donde quiera que estén.

Al Instituto Tecnológico de Ensenada por darme las facilidades y el apoyo económico para realizar mis estudios de doctorado.

A mi ALMA MÁTER, el regresar a ti fue la mejor decisión que pude haber tomado, disfruté cada uno de los días.

A todo el personal de la Universidad Autónoma de Baja California que con profesionalismo, recurso económico y calidad en el servicio, me apoyaron en cualquier trámite que requerí.

A todo el personal del Instituto Tecnológico de Ensenada que me apoyó moral y económicamente para lograr terminar mis estudios.

Al personal y al presidente municipal del XXI Ayuntamiento de Ensenada, quienes me ayudaron económicamente para asistir a eventos fundamentales durante el desarrollo de esta investigación.

A todos los participantes que me apoyaron con las diferentes evaluaciones realizadas en esta investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por darme los recursos para realizar mis estudios de doctorado.

ÍNDICE

	<u>Página</u>
<i>Dedicatoria</i>	v
<i>Agradecimientos</i>	vi
ÍNDICE	viii
Índice de figuras	xii
Índice de tablas	xiv
Listado de acrónimos	xvi
1. Introducción	1
1.1 Motivación y justificación.	2
1.2 Planteamiento del problema.	2
1.3 Preguntas de investigación.	3
1.4 Hipótesis de la investigación.	4
1.5 Objetivos de la investigación.	5
1.5.1 Objetivo general.	5
1.5.2 Objetivos específicos.	5
1.6 Metodología de investigación.	6
1.7 Contribuciones principales.	9
1.8 Alcances y limitaciones.	10
1.9 Contenido del documento.	11
2. Marco teórico	13
2.1 Enfermedad cerebrovascular (ECV).	13
2.1.1 Clasificación.	14
2.1.2 Epidemiología.	14
2.1.3 Factores de riesgo.	15
2.1.4 Nivel de afectación.	17
2.2 Rehabilitación después de una ECV.	19
2.3 Terapia de rehabilitación motriz ocupacional tradicional.	21

2.4 Terapia motriz de extremidades superiores usando AVs con retroalimentación háptica.	24
2.5 Desarrollo de AVs con retroalimentación háptica.	26
2.6 Diseño de productos.	30
2.7 Metodologías para la construcción de ontologías.	32
2.8 Taxonomía de las recomendaciones de diseño de los AVs para la rehabilitación motriz de extremidades superiores.	33
2.8.1 Configuración del ejercicio.	34
2.8.2 Asistencia en la ejecución del ejercicio.	36
2.8.3 Control de los resultados.	37
2.9 Resumen del capítulo.	37
3. Trabajos relacionados.	39
3.1 Guías para la prevención, rehabilitación y seguimiento de pacientes con ECV.	39
3.2 Diseño de terapias de rehabilitación.	45
3.3 Taxonomías y modelos para el diseño de AVs o juegos serios para la rehabilitación motriz de extremidades superiores.	47
3.4 Otros modelos relacionados al diseño de los AVs.	48
3.4.1 Ontologías genéricas para facilitar el modelado de los objetos en los AVs.	48
3.4.2 Ontologías para enfermedades neurológicas.	48
3.4.3 Ontologías para el expediente médico electrónico.	49
3.4.4 Ontologías para el diseño de dispositivos de asistencia a la rehabilitación motriz.	49
3.5 Hallazgos identificados.	49
3.6 Resumen del capítulo.	52
4. Modelo de diseño.	53
4.1 Metodología.	53
4.2 Modelo de diseño.	55

4.2.1 Configuración del ejercicio.	56
4.2.2 Asistencia en la ejecución del ejercicio.	59
4.2.3 Administración de los resultados.	61
4.3 Validación del modelo de diseño.	62
4.4 Resultados.	64
4.4.1 Comparación de los factores.	64
4.4.2 Aplicación de los factores.	68
4.5 Discusión.	79
4.6 Resumen del capítulo.	81
5. Prueba de concepto del modelo de diseño.	83
5.1 Trabajo relacionado.	84
5.2 Metodología.	87
5.2.1 AV con retroalimentación háptica.	87
5.2.2 Participantes.	88
5.2.3 Diseño experimental y procedimiento.	89
5.2.4 Medidas de resultado.	92
5.2.5 Análisis estadístico.	92
5.3 Resultados.	93
5.3.1 Datos de desempeño: eficiencia y precisión.	93
5.3.2 Datos subjetivos: carga de trabajo y percepción de utilidad, facilidad de uso y facilidad de aprendizaje.	94
5.3.3 Estados afectivos percibidos (observación indirecta).	98
5.4 Discusión.	99
5.5 Resumen del capítulo.	106
6. Representación formal de modelo de diseño: ontología VEULMoR.	109
6.1 Metodología.	110
6.2 Ontología VEULMoR.	111
6.3 Evaluación de la ontología.	116
6.3.1 Participantes.	116

6.3.2 Diseño experimental y procedimiento.	116
6.3.3 Análisis estadístico.	117
6.4 Resultados de la evaluación.	118
6.5 Discusión.	139
6.6 Resumen del capítulo.	141
7. Evaluación del uso de la ontología en el diseño de AVs.	143
7.1 Metodología.	143
7.1.1 Participantes.	143
7.1.2 Diseño experimental y procedimiento.	144
7.2 Resultados.	146
7.2.1 Percepción de utilidad, facilidad de uso e intención de uso.	146
7.2.2 Percepción de la carga de trabajo de la ontología.	147
7.2.3 Percepción de la carga de trabajo del proceso de diseño de los AVs.	148
7.2.4 Factores de diseño incluidos en las instancias de los AVs.	149
7.3 Discusión.	153
7.4 Resumen del capítulo.	154
8. Conclusiones, aportaciones y trabajo futuro.	156
8.1 Conclusiones.	156
8.2 Aportaciones.	159
8.3 Trabajo futuro.	165
Referencias.	168

Índice de figuras

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
Figura 1.1. Metodología del trabajo de investigación.	6
Figura 2.1. Clasificación de la enfermedad cerebrovascular (ECV).	15
Figura 2.2. Clasificación internacional del efecto del ictus o ECV.	18
Figura 2.3. Modelo declarativo de la recuperación motriz.	19
Figura 2.4. Los diferentes estados identificados en una sesión de terapia.	23
Figura 2.5. Componentes de un sistema háptico.	26
Figura 2.6. Áreas de investigación háptica.	27
Figura 2.7. Arquitectura básica de una aplicación de realidad virtual.	28
Figura 2.8. Ejemplos de dispositivos táctiles.	29
Figura 2.9. Dispositivos cinestésicos.	30
Figura 2.10. Taxonomía para el diseño de AVs para la rehabilitación motriz.	34
Figura 3.1. Ejemplo del algoritmo clínico para ubicar la afectación.	41
Figura 4.1. Flujo de la revisión de la literatura.	54
Figura 4.2. Recomendaciones para el diseño de AVs para la rehabilitación.	55
Figura 4.3. Modelo de diseño inicial para AVs de rehabilitación motriz.	56
Figura 4.4. Alcance de la adaptabilidad de los AVs.	73
Figura 4.5. Vista de los factores del modelo.	76
Figura 4.6. Vista de los factores del modelo según su impacto.	78
Figura 5.1. AV con retroalimentación háptica.	88
Figura 5.2. Participantes conduciendo el ejercicio.	89
Figura 5.3. Ejercicio en el laberinto háptico.	90
Figura 5.4. Resultados de la evaluación del ejercicio.	93
Figura 5.5. Resultados de la evaluación.	95
Figura 5.6. Resultados de las preguntas a ambos grupos (G1 y G2).	96
Figura 5.7. Resultados de la evaluación del ejercicio.	98
Figura 5.8. Emociones positivas de ambos grupos.	102
Figura 5.9. Emociones positivas de ambos grupos utilizando el LMC.	102
Figura 5.10. Emociones negativas para los participantes de ambos grupos.	103

Figura 5.11. Resultado de los estados afectivos por tipo de emoción.	104
Figura 6.1. Ontología VEULMoR representada en OWL.	111
Figura 6.2. Captura de pantalla de la herramienta Protégé de la ontología.	114
Figura 6.3. Clases principales de la ontología VEULMoR.	115
Figura 6.4. Participantes conduciendo la evaluación.	117
Figura 6.5. Vista del nivel de importancia promedio de las clases.	120
Figura 6.6. Vista de la importancia percibida por los expertos de dominio.	121
Figura 6.7. Vista de la importancia percibida por los desarrolladores.	121
Figura 6.8. Percepción promedio de: a) utilidad, b) facilidad de uso.	122
Figura 6.9. Ontología VEULMoR incluyendo las recomendaciones.	125
Figura 7.1. Usuarios finales que realizaron la evaluación de la ontología.	144
Figura 7.2. Usuarios finales conduciendo la evaluación.	145
Figura 7.3. Resumen de factores de diseño.	152

.

Índice de tablas

<u>Tabla</u>	<u>Página</u>
Tabla 2.1. Factores de riesgo del ictus isquémico.	16
Tabla 2.2. Factores de riesgo de ictus hemorrágicos.	16
Tabla 2.3. Ejemplo de pruebas clínicas usadas en pacientes con ECV.	21
Tabla 2.4. Características de la terapia motriz ocupacional tradicional.	24
Tabla 3.1. Tipo de tratamiento a pacientes con ECV.	43
Tabla 4.1. Principios de aprendizaje motriz.	62
Tabla 4.2. Principios de plasticidad dependientes de la experiencia.	63
Tabla 4.3. AVs utilizados para aplicar los factores de diseño del modelo.	68
Tabla 5.1. Resumen de trabajo relacionado.	86
Tabla 5.2. Datos demográficos de los participantes.	89
Tabla 5.3. Escala, criterios de valoración y descripción del cuestionario.	91
Tabla 5.4. Emociones básicas utilizadas.	92
Tabla 5.5. Resultados de la prueba estadística en la hipótesis H1.	94
Tabla 5.6. Resultados de la prueba estadística en las hipótesis H2 y H3.	95
Tabla 5.7. Resultados de la prueba estadística en las hipótesis H5 y H6.	99
Tabla 6.1. Clases principales de la ontología VEULMoR y sus definiciones	112
Tabla 6.2. Propiedades principales de la ontología VEULMoR.	113
Tabla 6.3. Resultados de la evaluación de las clases.	118
Tabla 6.4. Resumen de la prueba en la hipótesis H1.	119
Tabla 6.5. Recomendaciones de los expertos de dominio (G1).	123
Tabla 6.6. Recomendaciones de los desarrolladores de software (G2).	124
Tabla 6.7. Atributos de las clases de la ontología VEULMoR.	126
Tabla 7.1. Resumen de resultados de la evaluación de la ontología VEULMoR.	147
Tabla 7.2. Resumen de la prueba estadística en las hipótesis H1 y H2.	147
Tabla 7.3. Resumen de resultados de la evaluación de la ontología VEULMoR.	148
Tabla 7.4. Resumen de la prueba estadística en la hipótesis H3.	148
Tabla 7.5. Resumen de la carga de trabajo del proceso de diseño de los AVs.	149
Tabla 7.6. Resumen de la prueba estadística en la hipótesis H4.	149

Tabla 7.7. Resumen de la prueba no paramétrica en la hipótesis H4.	149
Tabla 7.8. Resumen del número de factores de diseño de los AVs.	150
Tabla 7.9. Resumen del estadístico en la hipótesis H5.	150

Listado de Acrónimos

A

ACM: Association for Computing Machinery.

AHA: American Heart Association.

AIT: Ataque Isquémico Transitorio.

ARM-GUIDE: upper limb rehabilitation system.

ASA: Association Stroke Association.

AV: Ambiente Virtual.

AVs: Ambientes Virtuales.

C

CCS: Canadian Cardiovascular Society.

CDA: Canadian Cardiovascular Society.

CESD: Medida de depresión a nivel función y estructuras del cuerpo.

CHEP: Canadian Hypertension Education Program.

CICESE: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

E

EBSCO: Online Research Database.

ECV: Enfermedad Cerebrovascular.

EuroQoL: Medida clínica para medir el nivel de afectación en la participación.

F

FR: factor de riesgo.

H

HCI: Human-Computer Interaction.

HIC: Hemorragia Intracerebral.

HRI: Interacción Robot-Computadora.

HS: Hemorragia Subaracnoidea.

HWARD: Robotic Hand Therapy Device.

I

IEEE: Instituto de Ingenieros en Eléctrica y Electrónica.

IMSS: Instituto Mexicano de Seguridad Social.

IQR: Rango Intercuartil.

ITE: Instituto Tecnológico de Ensenada.

K

KACTUS: metodología para la construcción de ontologías.

L

LACI: Infarto Lacunar.

LMC: Leap Motion Controller.

M

M: Media.

MCP: Articulación Metacarpo Falángica.

METHONTOLOGY: methodology for ontology construction.

MIME: Mirror Image Movement Enabler.

MIT-MANUS: Interactive Motion Technologies Inc. Cambridge, Massachusetts. USA.

N

NASA-TLX: NASA Task Load indeX.

NICE: Instituto Nacional de Salud y Excelencia de Cuidado.

O

OGMS: Ontología General de la Ciencia Médica.

OMS: Organización Mundial de la Salud.

OWL: Ontology Web Language.

P

PACI: Infarto Imparcial de la Circulación Anterior.

PHD-9: medida de depresión a nivel función y estructuras del cuerpo.

POCI: Infarto de la Circulación Posterior.

PROM: Rango de Movimiento Pasivo.

R

REHAB-ONTO: rehabilitation ontology.

S

SD: Desviación eStándar.

SENSUS: metodología para la construcción de ontologías.

SUS: System Usability Scale.

T

TACI: Infarto Completo de la Circulación Anterior.

TAM: Technology Acceptance Model.

TPAD: Touch PAD.

U

UABC: Universidad Autónoma de Baja California.

V

VEULMoR: Virtual Environment Upper Limb Motor Rehabilitation.

VR-WISE: conceptual modeling for virtual reality.

X

X3D: XML-based 3D language.

Capítulo 1

Introducción

Hoy en día, los desarrolladores de software se enfrentan al reto de crear entornos de simulación centrados en el usuario para la ejecución de tareas en tiempo real que apoyen las actividades de terapia de rehabilitación motriz [1]. Estos entornos, conocidos como ambientes virtuales (AVs), se convierten en una herramienta de medición objetiva, con validez terapéutica para los especialistas en rehabilitación y sus pacientes, p. ej. sobrevivientes de enfermedad cerebrovascular (ECV) [2]. Para el diseño de los AVs, los desarrolladores de software pueden basarse en las diferentes recomendaciones de diseño y guías del dominio clínico reportadas en la literatura, p. ej. [3]–[6]. Sin embargo, la heterogeneidad de las recomendaciones dificulta su entendimiento afectando el proceso de diseño de los AVs [7].

Por lo anterior, los desarrolladores de software requieren considerar la disparidad de las recomendaciones con el fin de incrementar la validez clínica de los AVs. No obstante, existe aún una brecha entre la fase de diseño de los AVs y su validez en el dominio de rehabilitación motriz [2].

Esta tesis de manera particular, aborda el diseño de los AVs mediante la propuesta de un modelo de diseño para la rehabilitación motriz de extremidades superiores de pacientes con ECV. Con este modelo se pretende facilitar el proceso de diseño e integrar una mayor cantidad de factores de diseño importantes según los especialistas en rehabilitación (terapeutas ocupacionales y físicos). El modelo de diseño propuesto se representó formalmente, generando una ontología llamada VEULMoR (*Virtual Environment Upper Limb Motor Rehabilitation*). La ontología VEULMoR fue usada por 41 desarrolladores de software y especialistas en HCI –usuarios finales- con la finalidad de generar instancias para AVs. Los resultados de esta evaluación proporcionaron evidencia de la alta aceptación por parte de los usuarios finales en términos de utilidad, facilidad de uso e intención de uso. Además, los resultados mostraron evidencia de que facilita el proceso de diseño e incrementa la posibilidad de identificar factores clave en las instancias de los AVs.

En este capítulo introductorio se describen la motivación y justificación, y el planteamiento del problema, después se presentan las preguntas de investigación que guiaron este trabajo,

para enseguida definir los objetivos a alcanzar. Posteriormente se describe la metodología de trabajo utilizada durante el desarrollo del mismo, las principales contribuciones y se finaliza con la descripción del contenido del resto del documento.

1.1 Motivación y justificación

En años recientes se han desarrollado varias estrategias innovadoras para mejorar la terapia de rehabilitación motriz de las extremidades superiores de pacientes con ECV. Algunas de estas estrategias incluyen la terapia de movimiento inducido, la electromiografía, el entrenamiento electromecánico asistido, la electro estimulación, y la robótica, entre otros [8]–[10]. Además, la incorporación de tecnologías emergentes como la realidad virtual y la retroalimentación háptica han atraído la atención de los investigadores por sus beneficios potenciales [11], [12]. Algunos de estos beneficios son la capacidad de repetición, retroalimentación, motivación, intervención temprana y entrenamiento basado en tareas (ver [8] y las referencias incluidas), entre otros.

Como se señala en [11], [13], la realidad virtual permite el diseño, creación y control de simulaciones en varias dimensiones, que proporcionan estímulos interactivos que pueden ser medidos y almacenados. Ofreciendo con ello, herramientas de rehabilitación y evaluación clínica que usualmente no están disponibles en los métodos de terapia tradicional. Además, cuando el AV tiene una retroalimentación multimodal (visual, auditiva, háptica), se agregan beneficios que son esenciales en la entrada/salida de muchas tareas de rehabilitación tales como la retroalimentación de fuerza y táctil o kinestésica [14].

1.2 Planteamiento del problema

A pesar de que existen varias propuestas para la implementación de diferentes sistemas de rehabilitación virtual, p. ej. [15]–[17], aún hay una brecha entre la fase de diseño de estos sistemas y su uso con pacientes con ECV.

El diseño de los AVs para la terapia motriz que satisfagan las necesidades específicas de los pacientes y terapeutas no es una tarea sencilla [18]. En la literatura existen metodologías o recomendaciones generales para el diseño de los AVs [19], además de heurísticas o criterios para evaluar su usabilidad [20], [21]. Sin embargo, dada la complejidad del diseño de los AVs para la terapia motriz, varios investigadores han compartido sus recomendaciones o guías del dominio clínico para ayudar en su desarrollo [3], [6]. Por un lado, las recomendaciones resultan en una variedad de principios, criterios, implicaciones,

factores de usabilidad o guías para el diseño de los AVs que buscan dar apoyo en las terapias de rehabilitación [22]–[26]. Por otro lado, las guías del dominio clínico buscan mejorar las intervenciones y tiempo de cuidado de los pacientes con ECV, p. ej. [27]–[29]. No obstante, estas recomendaciones de diseño y guías del dominio clínico son heterogéneas en su semántica. Además, no existen estándares comunes que representen la disparidad de recursos, lo cual hace complicado conectar las recomendaciones y guías heterogéneas [7]. Por lo anterior, no es una tarea sencilla para los desarrolladores de software el diseño de los AVs que tengan validez clínica.

Con el objetivo de unificar estas recomendaciones y guías, en esta tesis se propone la creación de un modelo de diseño representado formalmente en una ontología para la terapia de rehabilitación de extremidades superiores de pacientes con ECV. Con esta ontología se busca facilitar el diseño de los AVs e incrementar la posibilidad de incluir factores de diseño válidos para los especialistas en rehabilitación.

1.3 Preguntas de investigación

Con base en la problemática descrita en la sección anterior, se han definido las siguientes preguntas que guían este trabajo de investigación:

- En primer lugar se requiere dar respuesta a la pregunta: ¿Cuáles son los factores de diseño que se deben considerar para un AV de rehabilitación motriz de extremidades superiores para pacientes con ECV?, los cuales integren las recomendaciones de diseño y guías de dominio clínico. Para esto, se consideran las siguientes sub-preguntas:
 - ¿Cómo y qué tipo de información es la que se necesita para llevar a cabo la rehabilitación motriz de extremidades superiores en la terapia motriz ocupacional tradicional?
 - ¿Cuáles son los dispositivos de asistencia para la rehabilitación motriz que se han utilizado con los AVs?
 - ¿Qué recomendaciones de diseño o guías del dominio clínico se deben considerar para identificar los factores que componen los AVs?
- Posteriormente será necesario responder a la pregunta: ¿Cómo se puede representar formalmente el conjunto de factores de diseño para que sean considerados usables e importantes por los terapeutas físicos y ocupacionales –expertos de dominio?.

- ¿Cuáles son los componentes de la terapia motriz tradicional a considerar para conformar el modelo?
- ¿Cómo se relacionan los factores del modelo de diseño respecto a los principios de aprendizaje motriz y principios de neuroplasticidad?
- Al usar los factores del modelo para el desarrollo de un AV con retroalimentación háptica ¿Cuál es la percepción de usabilidad, desempeño, carga de trabajo y emociones de los participantes?
- De acuerdo a la evaluación del AV con los participantes, ¿Cómo se introducen los hallazgos de la evaluación para generar la representación formal del modelo para el diseño de los AVs?
- ¿Cuál es la percepción de utilidad, facilidad de uso, intención de uso y nivel de importancia del contenido y estructura de la representación formal del modelo por parte de desarrolladores de software y expertos de dominio?
- ¿Cuáles son las características de seguridad del modelo de acuerdo a los comentarios y sugerencias de los expertos de dominio?
- Finalmente es importante conocer ¿Cuál es el impacto del uso de la representación formal del modelo en el diseño de AVs con desarrolladores de software y especialistas en HCI -usuarios finales?, para lo cual se hace necesario responder las siguientes sub-preguntas:
 - ¿Cuál es la percepción de utilidad y carga de trabajo al usar la representación formal del modelo para generar instancias de AVs con desarrolladores de software y especialistas en HCI?
 - ¿Se disminuye la carga de trabajo del proceso de diseño de los AVs al usar la representación formal del modelo en la generación de instancias de AVs?
 - ¿Existe una posibilidad mayor de incluir factores de diseño en las instancias de los AVs al usar la representación formal del modelo?

1.4 Hipótesis de la investigación

La hipótesis de este trabajo de investigación es la siguiente:

Si desarrolladores de software usan un modelo que contiene un conjunto de factores para el diseño de ambientes virtuales de rehabilitación motriz de extremidades superiores de

pacientes con enfermedad cerebrovascular, entonces el modelo facilita el proceso de diseño e incrementa la posibilidad de incluir factores de diseño clave en las instancias de los AVs.

1.5 Objetivos de la investigación

1.5.1 Objetivo general

Definir y evaluar un modelo para el diseño de ambientes virtuales (AVs) para la terapia de rehabilitación motriz de extremidades superiores de pacientes con enfermedad cerebrovascular (ECV).

1.5.2 Objetivos específicos

- Identificar y clasificar las recomendaciones de diseño, guías del dominio clínico y dispositivos de asistencia para AVs de rehabilitación motriz de extremidades superiores.
- Identificar los factores que conforman la ontología para el diseño de AVs con base en las recomendaciones de diseño y las guías del dominio clínico según las fases de la terapia de rehabilitación motriz ocupacional tradicional.
- Implementar y evaluar un AV con retroalimentación háptica basado en los factores de diseño identificados en la ontología.
- Integrar en la ontología para el diseño de los AVs los resultados de la evaluación del AV.
- Determinar las fortalezas y debilidades de la ontología con desarrolladores de software y expertos de dominio (terapeutas físicos y ocupacionales).
- Determinar el impacto del uso de la ontología en el diseño de un AV con desarrolladores de software y especialistas en HCI.

1.6 Metodología de investigación

La metodología de investigación utilizada para el desarrollo de este trabajo consta de tres etapas: entendimiento, desarrollo y evaluación (ver Figura 1.1). Enseguida se describen las actividades llevadas a cabo en las diferentes etapas de la metodología.

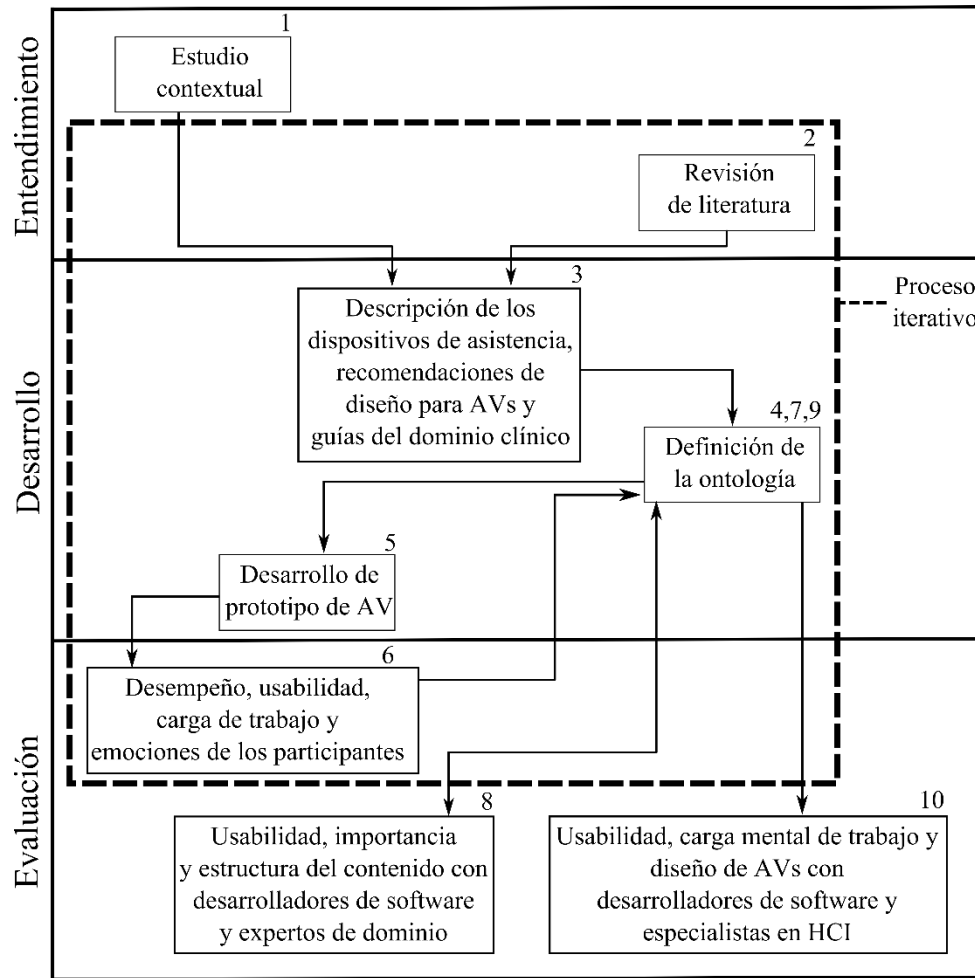


Figura 1.1. Metodología del trabajo de investigación.

1. *Estudio contextual.* Se realizó un estudio de contexto en un centro de rehabilitación de la localidad con el fin de entender cuál es el proceso de rehabilitación motriz tradicional para pacientes con ECV. Este estudio permitió identificar que los pacientes acuden al centro de rehabilitación para llevar a cabo actividades en la terapia física, cognitiva, de lenguaje, psicológica y ocupacional. En este estudio se enfocó en la terapia física y ocupacional como áreas principales en donde se rehabilita la motricidad de los pacientes.

2. *Revisión de literatura.* Se realizó un análisis bibliográfico con la finalidad de identificar los trabajos previos realizados en el tema propuesto y fundamentar un marco teórico para el presente trabajo. Con el resultado de este análisis se identificaron las características de la ECV, el proceso de terapia de rehabilitación motriz tradicional, los modelos o taxonomías para el diseño de AVs, los dispositivos de asistencia utilizados, los AVs para la rehabilitación motriz de extremidades superiores propuestos por otros autores, entre otros. La revisión de literatura se realizó durante todo el proceso de este trabajo de investigación.
3. *Descripción de los dispositivos de asistencia, recomendaciones de diseño para AVs y guías del dominio clínico.* Con base en la revisión de literatura se identificaron algunos de los dispositivos de interacción usados en la ejecución de los ejercicios mediante AVs. También se encontraron recomendaciones de diseño para los AVs propuestas por otros investigadores. Así mismo, se identificaron guías del dominio clínico que aportan ideas de diseño para los AVs.
4. *Definición de la ontología.* Tomando como base el estudio contextual, la revisión de literatura y las recomendaciones de diseño para AVs y guías del dominio clínico encontradas, se determinaron los factores de diseño de la representación semi-formal del modelo de diseño. De esta manera se tuvo la versión inicial del modelo de diseño representado en fases, categorías y factores.
5. *Desarrollo de prototipo de AV.* Con base en la representación en fases, categorías y factores se llevó a cabo el desarrollo de un prototipo para AV para la ejecución de un ejercicio lúdico. El ejercicio lúdico consistió en el recorrido de un laberinto usando como dispositivos de interacción un sensor de gestos –Leap Motion- y un dispositivo háptico –Novint Falcon.
6. *Evaluación de desempeño, usabilidad, carga de trabajo y emociones de los pacientes.* Usando el AV desarrollado se evaluó el efecto de la retroalimentación háptica en los participantes para determinar posibles diferencias en su desempeño, percepción de usabilidad, carga de trabajo y las emociones mostradas por los participantes.
7. *Definición de la ontología (2da iteración).* Con base en los resultados de la evaluación del AV se iteró el modelo de diseño para generar su representación formal –ontología. La ontología se representó utilizando la herramienta Protégé en el Lenguaje de

Ontologías Web (OWL). En esta representación se incluyeron diferentes medidas de resultado e instrumentos de medición para verificar el progreso de la rehabilitación de los pacientes, entre otros.

8. *Evaluación de usabilidad, importancia y estructura del contenido de la ontología con desarrolladores de software y expertos de dominio (terapeutas físicos y ocupacionales).* Se condujo una evaluación con expertos de dominio y desarrolladores de software para obtener i) su percepción del nivel de importancia de las clases de la ontología, ii) su percepción de la utilidad, facilidad de uso, facilidad de aprendizaje e intención de uso, iii) sus sugerencias y comentarios de la ontología. Como resultado de esta evaluación se generaron nuevos factores a considerar en la ontología y emergieron las características de seguridad de la ontología con base en los comentarios de los expertos de dominio. Con los datos generados de esta evaluación se generaron algunas de las conclusiones de la investigación.
9. *Definición de la ontología (3ra iteración).* Según los resultados de la evaluación con desarrolladores de software y expertos de dominio (terapeutas físicos y ocupacionales) se identificaron nuevos factores y una clase más -llamada Cuidador- que fueron integrados en la ontología.
10. *Evaluación de usabilidad, carga de trabajo y diseño de AVs con desarrolladores de software y especialistas en HCI (usuarios finales).* Se realizó una evaluación en donde los desarrolladores de software y especialistas en HCI -usuarios finales- usaron la ontología para generar instancias de AVs. Esta evaluación permitió obtener la percepción de usabilidad, la carga de trabajo de la ontología, la carga de trabajo del proceso de diseño de los AVs. Además, permitió mostrar evidencia de que al usar la ontología se incrementa la posibilidad de incluir factores de diseño en las instancias generadas para AVs. Con los datos obtenidos en esta evaluación se generaron las conclusiones de la investigación.

Resumidas las diez etapas que conforman la metodología utilizada en esta investigación, enseguida se define la contribución principal de esta tesis y otras dos contribuciones adicionales.

1.7 Contribuciones principales

La principal contribución derivada de este trabajo de tesis es *una ontología para el diseño de AVs de terapia de rehabilitación motriz de extremidades superiores, evaluada con terapeutas ocupacionales y físicos –expertos de dominio- y usuarios finales - desarrolladores de software y especialistas en HCI*. En el Capítulo 6 se representa la ontología llamada VEULMoR (*Virtual Environment Upper Limb Motor Rehabilitation*) que después de su evaluación quedó conformada por 21 clases principales. La ontología incluye los principios de aprendizaje motriz y los principios de neuroplasticidad identificados en la literatura. El contenido y estructura de la ontología VEULMoR fueron considerados como válidos e importantes o altamente importantes por los expertos del dominio. Además, en el Capítulo 7 se presenta la evaluación con los desarrolladores de software que muestra evidencia de que la ontología es considerada como útil, fácil de usar, fácil de aprender y con intención de usar. Por último, el uso de la ontología sugiere que facilita a los desarrolladores de software el proceso de diseño de los AVs e incrementa la posibilidad de incluir factores de diseño en las instancias de los AVs.

Además de la contribución principal, este trabajo de investigación obtuvo otras contribuciones que se explican brevemente a continuación:

1. *Un AV que puede ser usado en la terapia de rehabilitación motriz de extremidades superiores*. Como parte de la prueba de concepto del modelo de diseño se desarrolló un AV que fue evaluado con adultos mayores sanos y adultos mayores con problemas motrices en su brazo. Este AV puede ser configurado por el terapeuta de acuerdo a las capacidades del paciente y los resultados de progreso correspondientes. El AV presentado en el Capítulo 5, tiene dos dispositivos de interacción: el dispositivo háptico Novint Falcon y el controlador de gestos LEAP Motion. El progreso de los pacientes se obtiene objetivamente por medio de la eficiencia y la precisión en el ejercicio.
2. *Un conjunto de datos cuantitativos y cualitativos que resultaron de las evaluaciones de la ontología con los expertos de dominio y los desarrolladores de software*. Como resultado de la evaluación de la ontología se obtuvieron un conjunto de datos, que incluyen la percepción de utilidad, la facilidad de uso, la intención de uso, la facilidad de aprendizaje, la carga de trabajo de la ontología, la carga de trabajo del proceso de diseño de los AVs, el nivel de importancia del contenido de la ontología, sugerencias y

comentarios de la estructura de la ontología. El resumen y el análisis estadístico de este conjunto de datos se presenta en los Capítulos 6 y 7.

1.8 Alcances y limitaciones

El alcance principal de este trabajo de investigación es la definición y evaluación de un modelo de diseño representado formalmente mediante una ontología en apoyo al diseño de AVs para la terapia de rehabilitación motriz de extremidades superiores de pacientes con ECV. La definición del modelo ontológico se realizó con base en las recomendaciones de diseño para AVs encontradas en la literatura. Asimismo, la validación inicial del modelo se realizó al compararlo con los principios de aprendizaje motriz y principios de neuroplasticidad identificados en la literatura. Como prueba de concepto del modelo, se desarrolló y evaluó un AV en términos de usabilidad, carga de trabajo y emociones con adultos mayores con problemas motrices en su brazo. También, con ayuda de especialistas en rehabilitación y desarrolladores de software se evaluó la usabilidad y se mejoró el contenido y estructura del modelo. Adicionalmente, con apoyo de desarrolladores de software y especialistas en HCI que usaron el modelo propuesto, se obtuvo la percepción de usabilidad, la carga de trabajo del modelo y la carga de trabajo del proceso de diseño, y se generaron instancias de diseño para AVs. Por tanto, el alcance de esta investigación radica en la definición del modelo de diseño representado formalmente en una ontología. Por último, es importante mencionar que las implicaciones de las terapias de rehabilitación motriz en la función cerebral, la definición de arquitecturas, lenguajes o metodologías de desarrollo de los AVs no están dentro del alcance de este trabajo de investigación.

Respecto a las limitaciones de esta investigación, al representar el modelo formalmente mediante una ontología se agregaron beneficios que permiten -entre otras cosas- poblar la ontología e inferir y compartir conocimiento con ontologías y dominios relacionados. Aunque la población de la ontología se realizó con las instancias de AVs que generaron los desarrolladores de software, dichos beneficios no fueron profundizados en este trabajo de investigación. Sin embargo, ésta y otras directrices se proponen como trabajo futuro en la sección 8.3 del Capítulo 8.

1.9 Contenido del documento

El resto del documento está dividido en 7 capítulos los cuales se describen brevemente a continuación:

En el Capítulo 2 se presentan una serie de trabajos de distintas áreas de investigación con los cuales se caracteriza el marco teórico para entender y establecer en que consiste la rehabilitación motriz de extremidades superiores para pacientes con ECV usando AVs. De manera particular, se centran en la descripción de la ECV, su proceso de rehabilitación, el diseño de productos, las metodologías para la construcción de ontologías, el uso de AVs como herramienta de apoyo en la terapia de rehabilitación motriz y las ventajas de incorporar la retroalimentación háptica. También se describe una taxonomía creada a partir del análisis de la literatura respecto a las recomendaciones de diseño para los AVs.

En el Capítulo 3 se muestra un resumen de hallazgos generados con base en los trabajos de investigación que contribuyen a la generación de factores para el diseño de los AVs. Estos trabajos son guías del dominio clínico para la rehabilitación de los pacientes, modelos o taxonomías para el diseño de los AVs y otras ontologías relacionadas.

En el Capítulo 4 se describe un modelo de diseño conformado con base en las tres fases identificadas en la terapia de rehabilitación motriz tradicional: 1) configuración del ejercicio, 2) asistencia en la ejecución del ejercicio y 3) administración de los resultados. Este modelo de diseño fue validado según los principios de aprendizaje motriz y neuroplasticidad identificados. Además, los factores del modelo se utilizaron para clasificar AVs de rehabilitación motriz de extremidades superiores desarrollados en otras investigaciones.

En el Capítulo 5 se especifica la prueba de concepto del modelo al utilizarlo para el diseño de un AV evaluado con adultos mayores sanos y adultos mayores con problemas motrices en su brazo. Esta evaluación nos permitió determinar resultados preliminares basados en el efecto de la retroalimentación háptica en la percepción de usabilidad, la carga de trabajo, las emociones y el desempeño de los participantes. Además, la evaluación generó evidencia de la importancia de integrar el análisis del comportamiento de la interacción con el AV para entender mejor el posible progreso de los participantes al ejecutar el ejercicio de terapia.

En el Capítulo 6 se representa formalmente el modelo de diseño por medio de una ontología conformada por 20 clases. Esta ontología llamada VEULMoR se representó usando la herramienta Protégé en el Lenguaje de Ontologías Web (OWL). La ontología VEULMoR fue evaluada con terapeutas físicos y ocupacionales –expertos de dominio- y desarrolladores de software. Los resultados de la evaluación mejoran el contenido de la ontología y generan evidencia de su contenido es considerado como importante o altamente importante con base en los comentarios y sugerencias de los participantes. Además, con los comentarios y sugerencias de los expertos de dominio emergen temas para las características de seguridad de la ontología a considerar en el diseño de los AVs.

En el Capítulo 7 se describe la evaluación del uso de la ontología VEULMoR con desarrolladores de software y especialistas en HCI –usuarios finales- para generar instancias de AVs. La evaluación tuvo cuatro objetivos principales 1) identificar la utilidad de la ontología, 2) obtener la carga de trabajo de la ontología, 3) identificar la carga de trabajo del proceso de diseño de los AVs, y 4) determinar si existe evidencia de que con el método de diseño basado en la ontología se incrementa la posibilidad de incorporar factores de diseño en las instancias de los AVs.

En el Capítulo 8 se presentan las conclusiones y reflexiones derivadas de este trabajo. Además, se presentan las principales aportaciones entre las que se encuentran las publicaciones generadas a partir de esta tesis y otras colaboraciones; así como algunas oportunidades de trabajo futuro identificadas.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se presenta un análisis del impacto positivo que ha generado el uso de los AVs en la rehabilitación motriz de extremidades superiores de los pacientes con enfermedad cerebrovascular (ECV). Para abordar lo anterior, primeramente es necesario revisar la literatura para identificar las características de la ECV, como por ejemplo los tipos de ECV, su epidemiología, los factores de riesgo, y los niveles de afectación. Enseguida, se explica la importancia de la rehabilitación después de una ECV y algunos de los instrumentos que se utilizan en el área clínica para medir el progreso de los pacientes.

Además, en este capítulo se describe un estudio cualitativo realizado durante tres meses en un centro de rehabilitación regional que permitió entender a más detalle las características de la terapia de rehabilitación motriz tradicional de las extremidades superiores. Adicionalmente, se explica las diferentes dimensiones que tienen las recomendaciones para el diseño de productos y algunas metodologías para la construcción de ontologías identificadas en la literatura. Después, se explican algunos de los beneficios del uso de AVs con retroalimentación háptica para la terapia motriz de extremidades superiores y algunas de las consideraciones de diseño identificadas en la literatura para el desarrollo de los AVs. Por último, se presenta una taxonomía para el diseño de los AVs basada en las recomendaciones de diseño encontradas en la literatura.

2.1 Enfermedad cerebrovascular (ECV)

El término enfermedad cerebrovascular (ECV) hace referencia a cualquier alteración transitoria o permanente, de una o varias áreas del encéfalo como consecuencia de un trastorno de la circulación cerebral [30]. El término ictus se refiere a la ECV -aguda, subaguda o crónica- y engloba de forma genérica a un grupo de trastornos que incluyen la isquemia cerebral, la hemorragia intracerebral (HIC) y la hemorragia subaracnoidea (HS). En algunos países (p. ej. España) se recomienda el empleo del término ictus, en lugar de otros ya en desuso como “ataque cerebral” [31].

La ECV es una de las principales causas de muerte en el mundo de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS) [32]. Los sobrevivientes pueden sufrir en menor o mayor cantidad problemas en sus capacidades cognitivas y motrices, y como resultado, son incapaces de realizar sus actividades de la vida diaria. Después de un accidente, entre el 50% y 75% de las personas que sobreviven a una ECV son afectados en sus extremidades de las extremidades superiores [10]. En cuanto al alcance de la afectación en los pacientes después de una ECV incluye déficits motrices, sensoriales, de tono, cognitivos, comportamiento, comunicación, depresión, y percepción, entre otros [33].

2.1.1 Clasificación

La clasificación más sencilla y extendida de la ECV es la que hace referencia a su naturaleza, que la divide en dos grandes grupos: isquémica y hemorrágica (ver Figura 2.1). Asimismo, al considerar en la ECV variables como la etiología, la localización o el mecanismo de producción, se aplican distintos términos con el objetivo de mejorar su descripción. Por un lado, la isquemia se produce como consecuencia de la falta de aporte sanguíneo al encéfalo, mientras que la hemorragia se debe a la extravasación de la sangre por la rotura de un vaso sanguíneo intracraneal [31], [34].

2.1.2 Epidemiología

La epidemiología estudia la frecuencia con que ocurren las enfermedades, su distribución y los factores que se asocian a ellas. La edad media con que acontece la primera ECV en los varones es de 89.8 años, mientras que en las mujeres es de 74.8 años [35]. Además, la incidencia de la ECV se incrementa de forma progresiva con cada década de vida a partir de los 55 años, ocurriendo más de la mitad de los casos en pacientes mayores de 75 años [29], [36], [37].

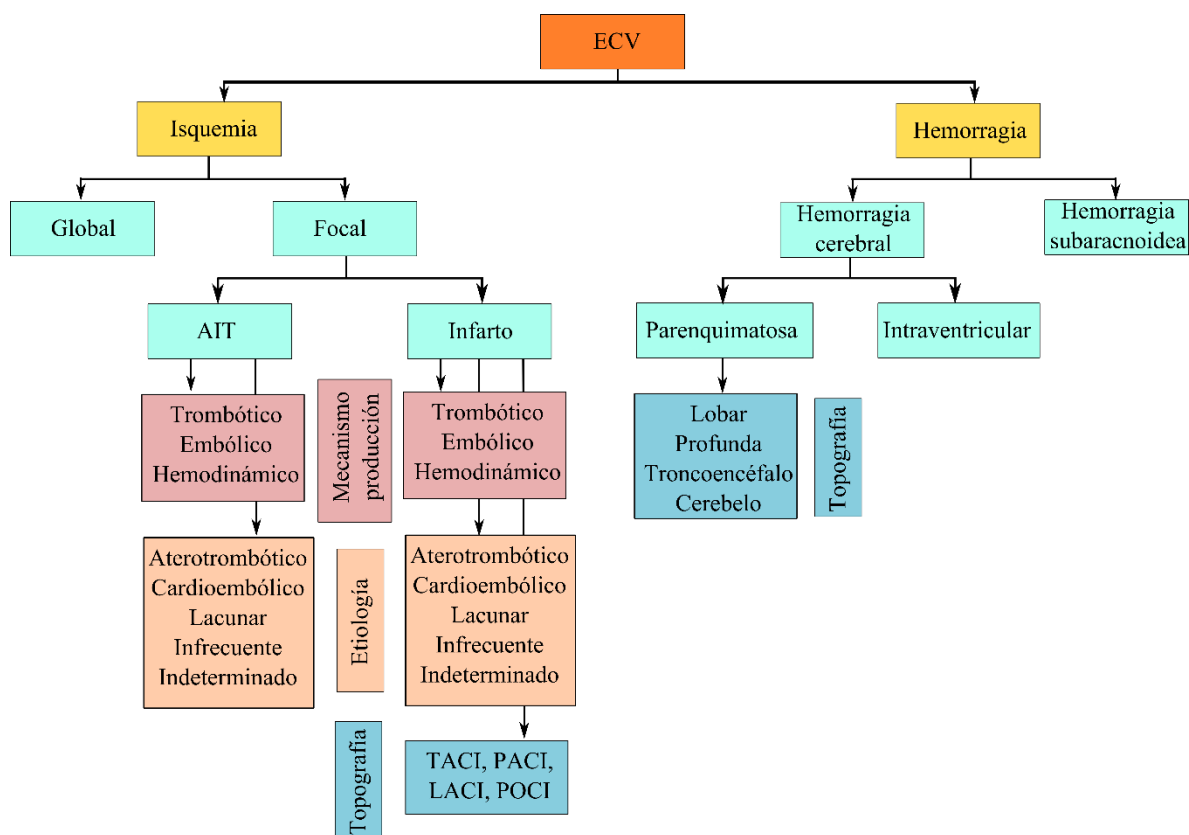


Figura 2.1. Clasificación de la enfermedad cerebrovascular (ECV) según su naturaleza. AIT: ataque isquémico transitorio; TACI: infarto completo de la circulación anterior; PACI: infarto imparcial de la circulación anterior; LACI: infarto lacunar; POCI: infarto de la circulación posterior (tomada de Martínez-Vila et al. [31]).

2.1.3 Factores de riesgo

Un factor de riesgo (FR) puede definirse como la característica biológica o hábito que permite identificar a un grupo de personas con mayor probabilidad que el resto de la población general para presentar determinada enfermedad a lo largo de su vida [38]. Su identificación permite establecer estrategias y medidas de control en los sujetos que todavía no han padecido la enfermedad (prevención primaria), o si ya la han presentado evitar o reducir el riesgo de recibirla (prevención secundaria). Los estudios epidemiológicos han identificado un gran número de FR para la ECV, lo que refleja la heterogeneidad de este síndrome (ver Tabla 2.1). Los FR de la ECV se dividen habitualmente en: factores no modificables, potencialmente modificables y modificables. El peso de los diferentes FR entre hemorragia cerebral y hemorragia intracraneal se señala en la Tabla 2.2.

Tabla 2.1. Factores de riesgo del ictus isquémico (modificada de Goldstein et al. [39] y Fuentes et al. [40]).

No modificables	Potencialmente modificables	Modificables
Edad	Síndrome metabólico	Hipertensión arterial
Género	Consumo de drogas	Tabaquismo, diabetes mellitus
Raza (negros, hispanos, blancos)	Alcoholismo	Dislipidemia, fibrilación auricular
Nivel sociocultural	Apnea obstructiva del sueño	Estenosis carotídea, terapia hormonal
Localización geográfica	Anticonceptivos orales	Fibrilación auricular
Factores hereditarios (historia familiar)	Migraña	Otras cardiopatías (endocarditis infecciosa, estenosis mitral, infarto miocardio reciente)
Bajo peso al nacer	Hiperhomocisteinemia	Anemia de células falciformes
	Elevación de la Lipoproteína (a)	Ictus isquémico o AIT (ataque isquémico transitorio) previo
	Estados inflamatorios o infecciones	Sedentarismo, factores dietéticos
	Estado de hipercoagulabilidad	Obesidad o actividad física
		Terapia hormonal posmenopáusica

Tabla 2.2. Factores de riesgo de ictus hemorrágicos (tomada de Sacco et al. [41]).
Significado: ++: fuerte evidencia; +: evidencia directa moderada; -: evidencia inversa moderada; ?: evidencia dudosa; 0: no hay relación.

Factor de riesgo	Hemorragia cerebral	Hemorragia subaracnoidea
Edad	++	+
Género femenino	-	+
Raza/etnia	+	+
Hipertensión	++	+
Tabaquismo	?	++
Consumo excesivo de alcohol	++	?
Anticoagulación	++	?
Angiopatía amiloide	++	0
Anticonceptivos orales	0	?
Hipocolesterolemia	?	0

2.1.4 Nivel de afectación

La OMS establece los niveles de afectación en los pacientes con ictus o ECV, con base en su clasificación internacional de funcionalidad, discapacidad y salud [42]. Estos niveles se dividen en i) funciones y estructuras del cuerpo, ii) actividades, y iii) participación. De acuerdo a estos tres niveles, Langhorne et al. [34] determina algunas de las principales afectaciones de los pacientes (ver Figura 2.2).

Como se observa en la Figura 2.2 son varias las afectaciones que presentan los pacientes con ECV. Problemas en el temperamento y personalidad, energía y manejo, propiocepción, movilidad, por ejemplo, son algunas de las afectaciones a nivel funcional de los pacientes. Además, afectaciones en el cerebro, el sistema cardiovascular, la región del hombro, las piernas y los brazos son las afectaciones a nivel estructura. Mientras que, en las actividades hay limitaciones al comunicarse, leer, escribir, calcular, moverse, e ir al baño, entre otros. Por último, la adquisición de bienes y servicios, la preparación de comidas, contar con un empleo remunerado son algunas de las restricciones en la participación de las actividades de la vida diaria que sufren los pacientes con ECV (ver Figura 2.2).

Después de una ECV, la parálisis unilateral (hemiplejia) es una de las afectaciones principales, seguida por trastornos en la coordinación, el balance y los movimientos [43]. La ECV puede clasificarse después del tiempo que ha transcurrido en tres etapas: aguda (0 a 3 meses), subaguda (3 a 6 meses) o crónica (después de 6 meses) [6].

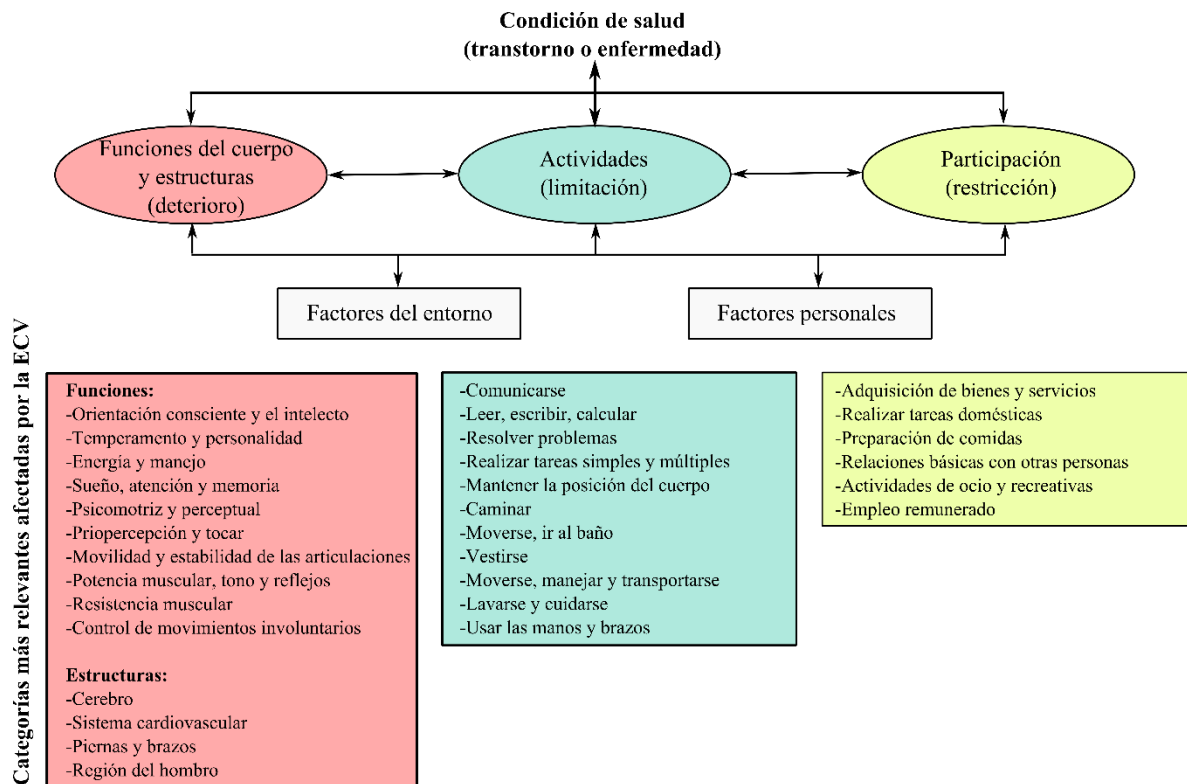


Figura 2.2. Clasificación internacional del efecto del ictus o ECV en una persona a nivel función, actividad y participación [42]. Categorías más relevantes afectadas por la ECV (adaptada de Langhorne et al.[34]).

En particular, en la recuperación motriz en la Figura 2.3 se muestran estas tres etapas posibles basadas en el tipo de recuperación de los pacientes [6]. En donde, la recuperación es un proceso complejo que ocurre con la combinación de procesos espontáneos y dependientes de aprendizaje, incluyendo la restitución (restablecimiento de la funcionalidad de la neurona dañada), la sustitución (reorganización de las neuronas con nuevas rutas que reaprenden funciones perdidas), y la compensación (mejora de la disparidad entre las habilidades perdidas en el paciente y las demandas del entorno) [34].

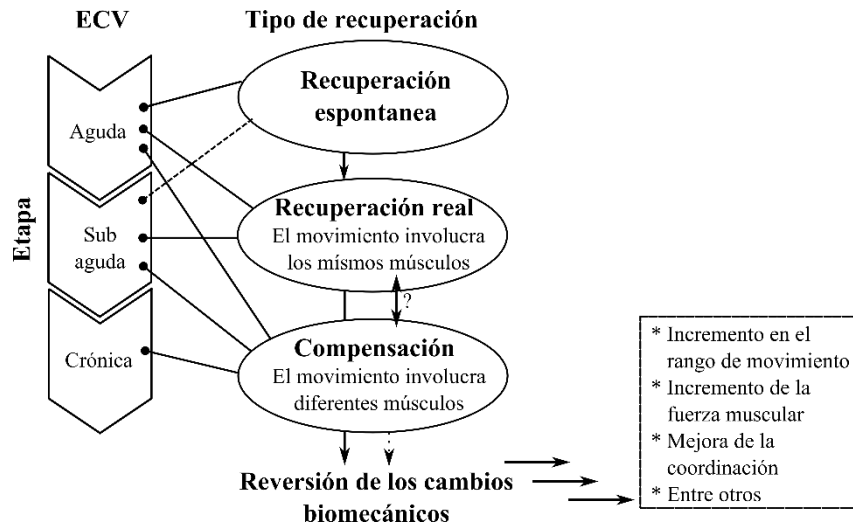


Figura 2.3. Modelo declarativo de la recuperación motriz basado en las tres etapas después de la ECV (adaptado de Timmermans et al. [6]).

En cualquier caso, el aprendizaje es la condición necesaria para que exista una recuperación real o compensación, y ésta puede ser lograda a través de la rehabilitación. En la mayoría de los casos esta recuperación se realiza en los primeros 6 meses después de la ECV [38]. En la recuperación mediante la plasticidad neuronal –caracterizada por la capacidad adaptativa del sistema nervioso central- se logran cambios en las funciones y estructuras del cerebro basadas en el tipo de recuperación lograda en el paciente [38], [44].

2. 2 Rehabilitación después de una ECV

En el proceso de rehabilitación de los pacientes es necesario considerar diferentes intervenciones que permitan reducir sus afectaciones de depresión o comunicación, motrices, sensoriales, cognitivas, y psicológicas, entre otras. De acuerdo a la Asociación Americana de Accidentes Cerebrovasculares (ASA, por sus siglas en inglés) [27] los puntos clave en la rehabilitación son:

- Prevenir complicaciones, minimizar discapacidades y maximizar funciones.
- Prevenir la recurrencia de las ECV.
- La rápida evaluación e intervención es crítico para optimizar la rehabilitación.
- Herramientas de evaluación válidas y evaluaciones estandarizadas son esenciales para el plan de tratamiento.
- Las intervenciones basadas en evidencia tienen que estar basadas en metas funcionales.

- Cada candidato a rehabilitar debe tener acceso a un grupo de rehabilitación coordinado y con experiencia a fin de asegurar resultados óptimos.
- Los pacientes y su familia y/o cuidadores son miembros esenciales en el grupo de rehabilitación.
- La educación del paciente y la familia mejora la toma de decisiones informadas, el ajuste social y el mantenimiento de las ganancias de la rehabilitación.
- El grupo de rehabilitación debe utilizar los recursos de la comunidad para la reintegración de la comunidad.
- La gestión médica continua de los factores de riesgo y comorbilidades es esencial para asegurar la supervivencia.

El uso de instrumentos de evaluación estándares para medir la afectación de los pacientes incrementa la probabilidad de asignar un nivel de cuidado adecuado y el desarrollo de las intervenciones [45]. En el caso de la rehabilitación motriz, son varios los tipos de intervenciones que se pueden proporcionar por medio de la farmacoterapia, la terapia de estimulación cerebral, y la terapia de ejercicios, entre otras [44]. En particular, en la terapia de ejercicios los terapeutas utilizan diversas estrategias e instrumentos distribuidos en las áreas de terapia física y terapia ocupacional. Donde la terapia de ejercicios en el área de terapia ocupacional, tiene el objetivo de fortalecer y mejorar la precisión, el rango de movimiento, la fuerza muscular, el tono muscular, entre otras funciones y estructuras del paciente.

La efectividad de la rehabilitación depende de varios factores que influyen la recuperación de los pacientes. Por ejemplo, el tipo de ECV, la localización de la lesión, el grado de lesión, la edad y el género del paciente, entre otros [43]. De aquí que, los parámetros para el proceso de rehabilitación requieren ser modificados acorde a los trastornos del paciente, las complicaciones y otras enfermedades. De acuerdo a la literatura, existen diversas pruebas clínicas que permiten medir la efectividad de la rehabilitación. Por ejemplo, la Tabla 2.3 presenta algunas de las pruebas clínicas usadas en pacientes con ECV para determinar, monitorear y dar seguimiento a la evolución de su nivel de afectación [33], [46]–[48].

Tabla 2.3. Ejemplo de pruebas clínicas usadas en pacientes con ECV.

Nivel de afectación	Prueba clínica o instrumento
Funciones del cuerpo y estructuras (deterioro)	Índice de motricidad
	Escala de espasticidad modificada de Ashworth
	Evaluación cognitiva de montreal
	Medida de independencia funcional
	CESD-Medida de depresión
	PHD-9 Medida de depresión
Actividades (limitación)	Caminar seis minutos
	Velocidad de la marcha
	Escala de balance Berg
	Prueba de bloque y caja
	Prueba de clavijas de nueve hoyos
	Actividades de la vida diaria de Barthel
	Instrumento de la vida diaria Lawton
Participación (restricción)	EuroQoL
	SF-36

Además de las pruebas clínicas que permiten conocer las mejoras funcionales de los pacientes, existen otros indicadores de la efectividad de la rehabilitación, p. ej. su reingreso al hospital, cómo convive el paciente en su comunidad, entre otros [49]. Sin embargo, las mejoras funcionales de los pacientes dependen de su capacidad de recuperación cerebral [50]. Esta capacidad se denomina neuroplasticidad e implica cambios en el tejido neural que incluyen la regeneración axonal, colateralización, neurogénesis, sinaptogénesis y reorganización funcional, entre otros mecanismos [51]. Las implicaciones a nivel cortical quedan fuera del alcance de esta investigación, para más información referirse a [44], [52]–[54].

Enseguida se explica un estudio contextual realizado en un centro de rehabilitación regional. El objetivo de este estudio contextual fue el mejorar el entendimiento de las actividades que se realizan en la rehabilitación motriz tradicional.

2.3 Terapia de rehabilitación motriz ocupacional tradicional

Se realizó un estudio cualitativo durante tres meses en un centro de rehabilitación regional localizado en Ensenada, Baja California, México, para tener un entendimiento de la terapia motriz de extremidades superiores tradicional. En el centro de rehabilitación trabajan doce especialistas (p. ej. especialistas en medicina de rehabilitación, terapeutas ocupacionales,

psicólogos, entre otros) que dan atención a aproximadamente 80 pacientes con problemas psicológicos, cognitivos o motrices. En la recolección de datos se aplicaron entrevistas estructuradas y no estructuradas a 5 de los 12 especialistas, de los cuales fueron un médico especialista en rehabilitación, un terapeuta ocupacional, dos terapeutas físicos y un psicólogo. Todos ellos contestaron un cuestionario de 40 preguntas con escala Likert 5. Además, se llevaron a cabo ocho sesiones de observación directa no participativa (30 minutos cada una, 4 horas en total) involucrando a cinco pacientes con diferentes patologías, tales como cirugía del túnel del carpio, ECV y otras lesiones cerebrales. Las entrevistas y sesiones de observación fueron grabadas, transcritas y analizadas utilizando teoría fundamentada [55].

Como resultado, identificamos que los pacientes acuden a sesiones de terapia física, cognitiva, de lenguaje, psicológica u ocupacional acorde al nivel de afectación que tengan y la etiología de su padecimiento. La terapia ocupacional es parte de la rehabilitación dirigida a recuperar la independencia de los pacientes después de una ECV [43]. La terapia ocupacional tiene el objetivo de facilitar el desempeño de los pacientes mediante la mejora de sus habilidades o por medio de la enseñanza de estrategias compensatorias para sobrellevar las habilidades perdidas [47]. La OMS clasifica las intervenciones de terapia ocupacional en seis categorías: 1) el entrenamiento de funciones sensoriales-motrices; 2) el entrenamiento de funciones cognitivas; 3) el entrenamiento de habilidades tales como la vestimenta, el cocinar o la realización de actividades domésticas; 4) el asesoramiento e instrucción en el uso de dispositivos de asistencia; 5) la provisión de férulas; y 6) el entrenamiento y educación para la familia y los cuidadores primarios [42], [47].

La terapia de rehabilitación motriz ocupacional se divide en diferentes sesiones que dependen del grado de afectación de los pacientes. La Figura 2.4 muestra los diferentes estados de la sesión de terapia ocupacional tradicional identificados. En promedio, una sesión de terapia tradicional tiene una duración de 30 minutos [56], [57]. Durante la primera sesión, el terapeuta ocupacional crea un programa de terapia individual basado en la valoración inicial del paciente. En las siguientes sesiones, el terapeuta ocupacional selecciona los artefactos, los ejercicios y el equipamiento que van a ser utilizados por los pacientes en cada sesión de terapia de rehabilitación. Luego, el terapeuta revisa el programa de terapia del paciente evaluando su progreso y realiza los cambios de tratamiento

necesarios. Con base en esta revisión, el terapeuta ocupacional explica y muestra cómo es que el paciente debe realizar los ejercicios en la sesión de terapia actual. El resto de la sesión de terapia es llevada a cabo bajo la supervisión y la asistencia del terapeuta ocupacional. Finalmente, el terapeuta ocupacional analiza el desempeño del paciente y escribe los resultados en su expediente médico (ver Figura 2.4).

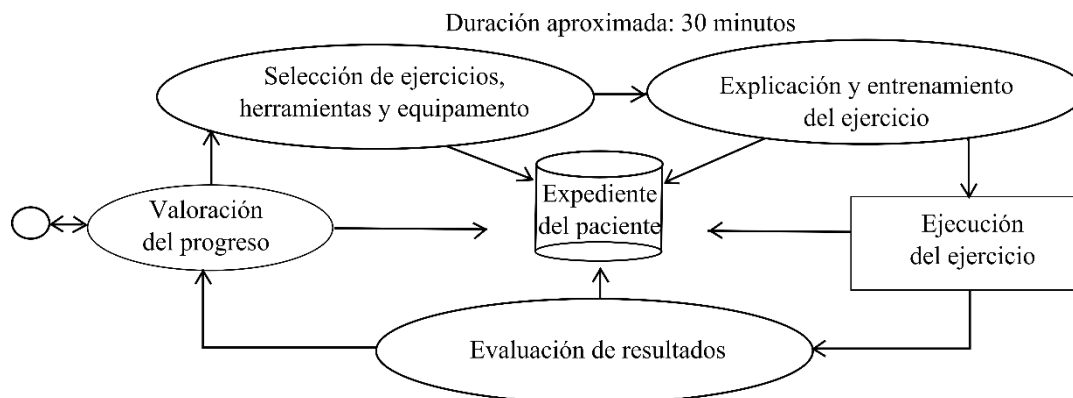


Figura 2.4. Los diferentes estados identificados en una sesión de terapia motriz ocupacional tradicional.

Adicionalmente, la Tabla 2.4 muestra las características principales identificadas de la terapia ocupacional tradicional que los especialistas en rehabilitación buscan mejorar en las habilidades de las motrices de los pacientes [4]. Los terapeutas ocupacionales, por ejemplo, utilizan estrategias lúdicas para motivar a los pacientes. Además, los ejercicios son seleccionados dependiendo de la función que se busca mejorar o recuperar, siendo algunos: i) la fuerza muscular (p. ej. empujar, mover o presionar objetos de diferentes forma, peso, tamaño o textura), ii) la coordinación vista-mano (p. ej. resolver rompecabezas, laberintos y colocar figuras), iii) el rango de movimiento (p. ej. estirar ligas), y iv) incrementar la sensibilidad (p. ej. tocar objetos con diferentes texturas), entre otros.

Sin embargo, en la terapia de rehabilitación motriz ocupacional, desde hace más de 20 años los especialistas en rehabilitación (médicos, terapeutas, psicólogos) han introducido el uso de tecnología para fortalecer el tratamiento, medición y seguimiento de los pacientes [58]. Estas tecnologías de rehabilitación se han desarrollado para mejorar las estrategias utilizadas la recuperación motriz de pacientes con ECV. Algunas de estas estrategias incluyen la terapia de movimiento inducida, la electromiografía, el entrenamiento electromecánico asistido, la electro estimulación, la terapia de ejercicios por medio de AVs, la robótica, el entrenamiento de tareas repetitivas, entre otros [8]–[10]. En particular, la

literatura reporta que cuando se utilizan AVs se incrementa el entretenimiento, la adherencia y la motivación de los pacientes, además de una mejora motriz en las extremidades superiores de los pacientes con ECV [9], [10].

Tabla 2.4. Características de la terapia motriz ocupacional tradicional para las extremidades superiores.

Propiedad	Dimensión
Característica	Basada en actividades lúdicas o formales
	Movimientos basados en objetivos
	Ejercicios para movimientos específicos
Artefacto	Juguetes, objetos de la vida diaria, texturas, espejos
Equipamiento	Mecanoterapia, Electroterapia
Ejercicio	Mover, colocar, insertar y presionar diversos artefactos
Funciones a recuperar/mejorar	Fuerza
	Sensibilidad
	Rango de movimiento
	Precisión (coordinación vista-mano)
Etiología	Tono muscular
	Defecto de nacimiento
Problema	Enfermedad o accidente
	Ausencia del paciente y la falta de motivación
	Evaluación subjetiva
Estrategia	Falta de tecnología que motive a realizar los ejercicios
	Actividades formales o lúdicas de acuerdo a las capacidades de los pacientes

De acuerdo a la literatura, en la siguiente sección explicamos algunos de los beneficios de los AVs con retroalimentación háptica para la rehabilitación motriz de extremidades superiores de los pacientes con ECV.

2.4 Terapia motriz de extremidades superiores usando AVs con retroalimentación háptica

La incorporación de tecnologías emergentes en la terapia de rehabilitación, tales como la realidad virtual y la retroalimentación háptica ha atraído la atención de los investigadores y terapeutas por sus beneficios potenciales. La realidad virtual se puede definir como I³ por la combinación de Inmersión-Interacción-Imaginación [59]. Como se señala en [3], [11], la realidad virtual permite el diseño, creación y control de entornos simulados en varias dimensiones y con estímulos interactivos válidos, en donde las acciones o tareas pueden ser

almacenadas y medidas, proporcionando de esta forma herramientas de rehabilitación y evaluación clínica que usualmente no están disponibles en los métodos de terapia tradicional. Así, mediante el AV el usuario interactúa con un sistema simulado en una computadora por medio del cual tiene experiencias de interacción principalmente audiovisuales [60].

Algunas ventajas del uso de AVs en la terapia de rehabilitación motriz de extremidades superiores son [10], [45]:

- Incrementan la motivación, entretenimiento y adherencia de los pacientes.
- Hay transferencia del conocimiento motriz del entorno virtual al real.
- Intensidad controlada en los movimientos.
- Variabilidad de los ejercicios.
- Tareas específicas a ciertas funciones y movimientos.
- Retroalimentación de los resultados y el progreso del paciente.
- Combinación con estrategias de cómputo afectivo para guiar y mejorar la interacción.
- Combinación con dispositivos de medición fisiológica.
- Combinación con dispositivos de interacción acorde a las capacidades del paciente.

Además, cuando la retroalimentación háptica se incorpora en los AVs se proporcionan beneficios esenciales que se requieren en la entrada o salida de varias tareas de rehabilitación, como la retroalimentación de fuerza, táctil o cinestésica [61]. La retroalimentación háptica es una modalidad sensorial crucial en las interacciones con los AVs [62]. El término háptica tiene sus orígenes en la palabra griega *hapthestai* que significa poder tocar [63]. La retroalimentación háptica agrupa las modalidades de retroalimentación de fuerza, táctil y propiocepción [2], [64]. La retroalimentación de fuerza integrada en los AVs proporciona datos de los objetos virtuales, por ejemplo, su dureza, peso o inercia [59]. La retroalimentación táctil se utiliza para dar al usuario una sensación virtual de la geometría de la superficie de contacto de los objetos, como la suavidad, el deslizamiento y la temperatura. Finalmente, la retroalimentación propioceptiva detecta la posición del cuerpo y postura del usuario [65]. Un sistema háptico es capaz de transmitir por medio de una interfaz o dispositivo háptico, sensaciones táctiles como fuerza o

vibración, las cuales el usuario percibe en su cuerpo (p. ej. mano, pierna) al manipular el dispositivo [60], [64] (ver Figura 2.5).

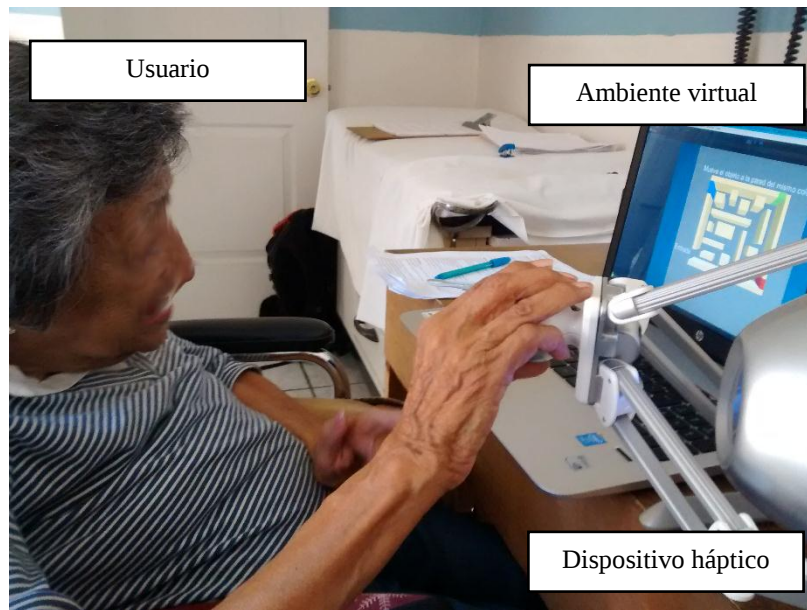


Figura 2.5. Componentes de un sistema háptico: el AV, el dispositivo háptico y el usuario (adaptado de El Saddik et al. [60]).

2.5 Desarrollo de AVs con retroalimentación háptica

El desarrollo de entornos audio-visuales-hápticos p. ej. AVs con retroalimentación háptica, involucra comprender tres caminos diferentes: la *háptica humana*, la *háptica de máquina*, y la *háptica de computadora*. Lo que envuelve estos tres caminos es conocido como *háptica de multimedia* (ver Figura 2.6) [60].

En primer lugar, la *háptica humana* estudia el sentir y la manipulación humana mediante las sensaciones cinestésicas y táctiles. En segundo lugar, la *háptica de máquina* se encarga del diseño y desarrollo de interfaces humanas con base en el conocimiento de las capacidades y limitaciones del sentido del tacto. De tal forma que la *háptica humana* se encarga del diseño, construcción y desarrollo de dispositivos mecánicos que reemplazan o aumentan el sentido del tacto. Por último, la *háptica de computadora* se desarrolla una vez que se han creado las interfaces generadas en la *háptica de máquina*. La *háptica de computadora* se relaciona con el diseño y desarrollo de algoritmos de software que programan las fuerzas de interacción y propiedades físicas de los objetos simulados, lo que incluye la detección de colisiones y los algoritmos de respuesta. Por lo que, la

representación háptica se refiere al conjunto de algoritmos y técnicas que son utilizadas para programar y generar fuerzas y torsiones de respuesta cuando una interfaz háptica - representada por un avatar en el entorno virtual- choca con un objeto virtual dentro del ambiente.

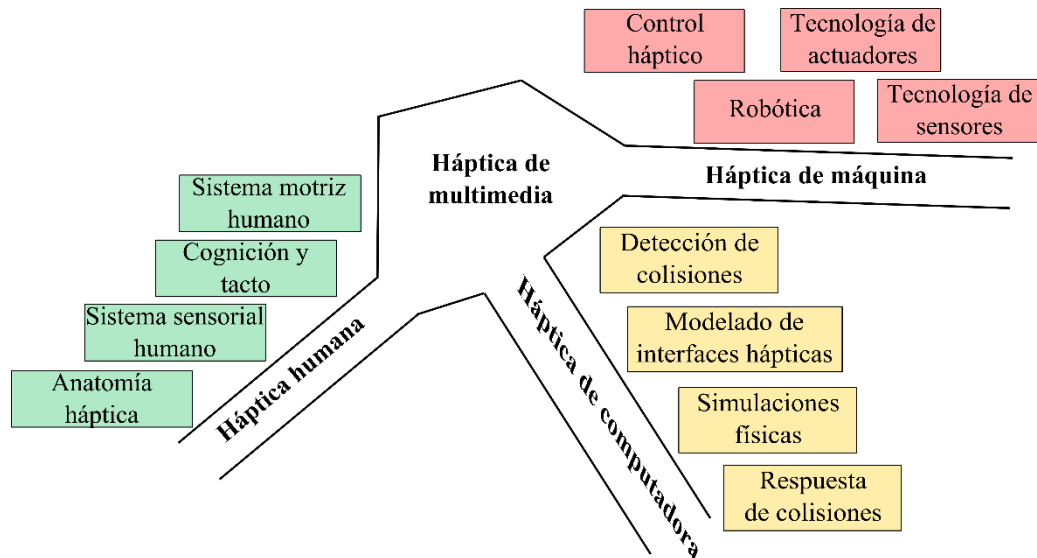


Figura 2.6. Áreas de investigación háptica para el desarrollo de sistemas audio-visuales-hápticos p. ej. AVs con retroalimentación háptica (tomada de El Saddick et al. [60]).

La Figura 2.7 muestra los principales componentes de un aplicación de realidad virtual que incorpora retroalimentación visual, auditiva y háptica [63]. Como se observa en la Figura 2.7, los principales componentes son:

- La máquina de simulación responsable de ejecutar en todo momento el entorno del AV.
- Los algoritmos de representación visual, auditiva y háptica los cuales programan las fuerzas de respuesta, los sonidos y los gráficos proporcionados al usuario.
- Los transductores (sensores y actuadores) que convierten las señales visuales, de audio y de fuerza de una forma que el operador las pueda percibir.
- El usuario el cual típicamente toma o viste la interfaz háptica y percibe la retroalimentación audiovisual mediante dispositivos de audio (p. ej. altavoces, audífonos, entre otros) y de despliegue (p. ej. pantalla de la computadora o pantallas montadas en la cabeza).

Mientras que los canales visuales y auditivos regularmente reciben información y energía unidireccional (desde la máquina de simulación hacia el usuario), la modalidad háptica intercambia información y energía en ambas direcciones, desde y hacia el usuario. Esta bidireccionalidad a menudo es referida como la característica más importante de la modalidad de interacción háptica [66]. Por tanto, un AV multimodal es aquel que combina la información sensorial -visual, auditiva y háptica [2].

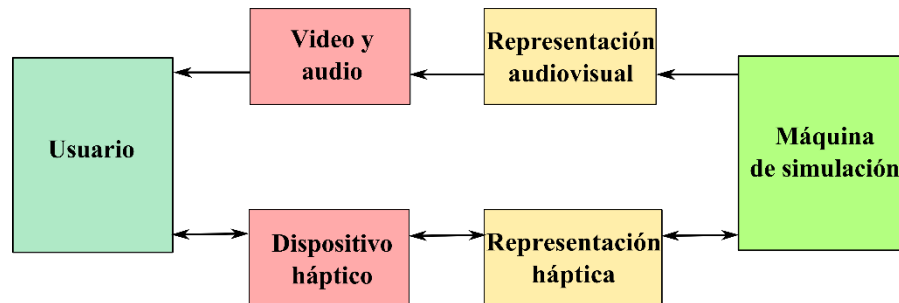


Figura 2.7. Arquitectura básica de una aplicación de realidad virtual incorporando retroalimentación visual, auditiva y háptica (modificada de Salisbury et al. [63]).

Para la interacción con los AVs, existe una gran variedad de dispositivos hápticos o robóticos disponibles para dar asistencia a la terapia de rehabilitación motriz superior [66]–[68]. La clasificación de los dispositivos hápticos depende de la perspectiva que se utilice. Una de las más importantes y posiblemente la más común es la que distingue a los dispositivos por el tipo de estímulo que proporcionan: cinestésico o táctil [68]. Las sensaciones táctiles y cinestésicas (propioceptivas) son fundamentales para la manipulación y locomoción.

Además, las sensaciones de vibración proporcionan la percepción de la oscilación de los objetos al contacto con la piel [66]. Los dispositivos táctiles son interfaces capaces de reproducir:

- Sensaciones táctiles, tales como presión, textura, propiedades termales, punciones, suavidad, humedad, entre otros.
- Fenómenos de fricción inducida, tales como deslizamiento, adhesión, pequeñas fallas, entre otros.
- Características locales de los objetos, como forma, ángulos, relieve y huecos.

Dos de los dispositivos táctiles encontrados en la literatura se presentan en la Figura 2.8. En la parte izquierda de la Figura 2.8, se muestra la tableta háptica TPAD que utiliza una pantalla para proporcionar retroalimentación de la forma y textura de las imágenes desplegadas [69]. En la parte derecha de la Figura 2.8, se presenta el guante DataGlove el cual es un guante de neopreno con dos sensores en cada dedo [70].

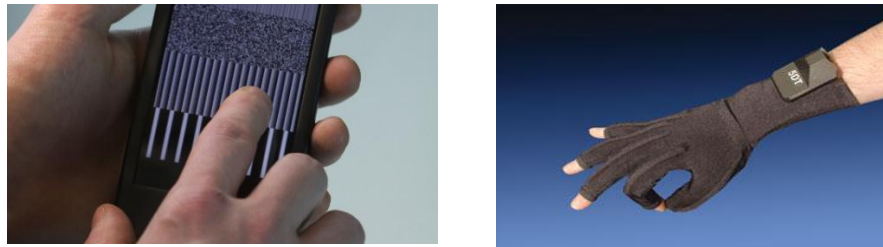


Figura 2.8. Ejemplos de dispositivos táctiles: tableta con pantalla háptica TPAD (izquierda); guante DataGlove (derecha).

Por otro lado, los dispositivos cinestésicos o propioceptivos son capaces de reproducir el estado de los objetos, tales como la posición, velocidad y las fuerzas aplicadas con los músculos a través de una variedad de receptores localizados en la piel, articulaciones y tendones [66]. Además, los dispositivos cinestésicos pueden ser clasificados como dispositivos con efector final o exoesqueletos. De acuerdo a la literatura, los primeros dispositivos exoesqueletos fueron desarrollados en 1992 por Bermasgo y colegas [66], [71]. Además, según la literatura los dispositivos robóticos MIT-MANUS, ARM-GUIDE y MIME son los dispositivos ampliamente evaluados para la terapia de mano de pacientes que han sufrido una ECV. La Figura 2.9 presenta dos dispositivos hápticos capaces de generar sensaciones cinestésicas [72]. Para más información relacionada a los dispositivos robóticos para la rehabilitación motriz de extremidades superiores se recomienda consultar Maciejasz et al. [73], Van Delden et al. [74] y Gopura et al. [75].



Figura 2.9. Dispositivos cinestésicos: Novint Falcon (izquierda), Immersion CyberForce (derecha).

Hasta el momento se han mencionado algunas de las ventajas de usar AVs con retroalimentación háptica en la rehabilitación motriz de extremidades superiores de pacientes con ECV. Además, se han explicado las cuatro ramas principales en el desarrollo de aplicaciones usando retroalimentación háptica y algunos de los dispositivos hápticos disponibles en la literatura. Enseguida, se explican las diferentes dimensiones de diseño encontradas en la literatura para el diseño de productos, p. ej. AVs.

2.6 Diseño de productos

A medida que el campo del diseño de interfaces ha madurado, los principios de interacción también han evolucionado, desde un conjunto único y “universal” a un conjunto de modelos que requieren seguir evolucionando [76]. Algunos de estos principios de diseño de interacción se han orientado a la generación de guías para todas las interfaces de usuario, mientras que otras para una representación más específica, p. ej. AVs [3], [77]–[80] o bases de datos. Algunos autores consideran los principios universales que están libres de funciones y pueden ser interpretados y mapeados a las representaciones más detalladas [76]. Norman [81] (1990), en su libro “*The Design of Everyday Things*”, sugiere que la buena visibilidad de las propiedades percibidas de un objeto, la capacidad de construir modelos conceptuales a partir de él y proporcionar retroalimentación eficiente a las acciones de los usuarios, son los principios generales de un buen diseño para usabilidad. Un principio de diseño ayuda a los diseñadores de interacción con su proceso de pensamiento cuando diseñan una experiencia de uso [1]. Un principio o criterio de diseño proporciona una guía para el proceso de diseño y desarrollo de aplicaciones, pero necesita

ser adaptado al contexto de uso [82]. Algunos de los principios de diseño más comunes son: visibilidad, retroalimentación, restricciones, consistencia y *affordance* [1].

Nielsen y Molich [83], proporciona 9 reglas generales o heurísticas para el diseño de interfaces, las cuales permiten evaluar los prototipos de diseño o sistemas como aplicaciones de escritorio o Web. Las reglas generales propuestas por Nielsen y Molich [83] son: lenguaje natural y simple, hablar el lenguaje del usuario, minimizar la carga mental del usuario, ser consistente, proporcionar retroalimentación, proporcionar claramente las salidas, proporcionar accesos directos, buenos mensajes de error, y prevenir errores. Sin embargo, el alcance de Nielsen y Molich no abarca el diseño de interfaces de usuario en 3D [76].

Similarmente, los principios para soportar la usabilidad sugeridos por Dix et al. [82] (1997) en su libro *Human-Computer Interaction* y los principios iniciales de interacción propuestos por Tognazzini (*Nielsen Norman Group*) [84], no son suficientes para contextos en 3D [76]. La usabilidad se refiere a que desde la perspectiva del usuario, un producto es fácil de aprender, efectivo de usarse, y genera disfrute [1]. Más específicamente, la usabilidad tiene como objetivos que un producto sea efectivo de usar (efectividad), eficiente de usar (eficiencia), seguro de usar, que tenga buena utilidad, fácil de aprender, y que su uso sea fácil de recordar (memorabilidad) [1].

En contraste, una guía de diseño es una descripción textual, prescriptiva e imperativa basada en prácticas teóricas y empíricas para resolver problemas particulares de diseño [1]. Por ejemplo, en Meza-Kubo et al. [85] se propone un conjunto de guías para el diseño de aplicaciones de estimulación cognitiva utilizables por el adulto mayor.

Por otro lado, un modelo es una abstracción de una teoría que viene a contribuir en una disciplina, como por ejemplo la psicología que puede ser directamente aplicada al diseño de una interacción [1]. Un modelo de diseño es un conjunto de principios, reglas y propiedades que guían el diseño de una interfaz [1]. El modelo describe cómo combinar las técnicas de interacción de forma adecuada y consistente para definir la forma en que se apreciará la interacción desde la perspectiva de los usuarios. Las propiedades del modelo pueden ser utilizadas para evaluar diseños de interacción específicos [82]. Por ejemplo, Norman (1988) desarrolló modelos de interacción de usuario basados en teorías del proceso cognitivo, que tienen la intención de explicar la forma en que los usuarios interactúan con

las tecnologías [1]. Para representar un modelo formalmente es posible construir una ontología [86]. De acuerdo a Neches et al. [87] “una ontología define los términos básicos y relaciones del vocabulario de un tema en un área, así como las reglas para combinar términos y relaciones para definir extensiones del vocabulario”. Son varias las ventajas de construir una ontología, algunas de éstas son la inferencia de conocimiento, el compartir conocimiento del dominio, entre otras [88].

En la siguiente sección se explican algunas de las metodologías para la construcción de ontologías encontradas en la literatura.

2.7 Metodologías para la construcción de ontologías

Una metodología es “una serie de técnicas o métodos integrados para crear sistemas generales o teorías mediante un trabajo intensivo” (IEEE, 1995). Un método es “un proceso o procedimiento ordenado que es usado en la ingeniería de un producto o la ejecución de un servicio” (IEEE, 1990). Una técnica es “un procedimiento de administración usado para lograr un objetivo dado” (IEEE, 1990). La principal diferencia entre los métodos y técnicas es que los métodos requieren un orden mientras que las técnicas no. Sin embargo, ambos métodos y técnicas son parte de las metodologías [88]. El uso de metodologías proporciona un proceso que la terminación exitosa de un proyecto.

Sin embargo, en el campo de la ingeniería ontológica, el proceso de construcción de ontologías es una actividad de ingeniería que depende de la experiencia del grupo de desarrollo [88]. En el proceso de desarrollo de la ontología, cada grupo de desarrollo usualmente sigue sus propios conjuntos de principios, criterios de diseño y fases [88]. Por tanto, en la literatura existen varias metodologías para el desarrollo o construcción de ontologías [89]. Estas metodologías permiten la construcción de ontologías desde cero o mediante el re-uso de otras ontologías. Algunas de las metodologías de construcción de ontologías encontradas en la literatura son las propuestas de Uschold y King [90], Grüninger y Fox [91], KACTUS [92], Cyc [93], SENSUS [94], On-To-Knowledge [95], y METHONTOLOGY [86], [88].

En particular, la metodología METHONTOLOGY -desarrollada en el laboratorio de inteligencia artificial de la Universidad de Madrid- permite la construcción de ontologías

desde cero, al reusar otras existentes o mediante el proceso de reingeniería [86]. METHONTOLOGY se utilizó para construir la ontología de esta investigación y está conformada por las siguientes actividades [86], [88]:

- *Especificación.* En esta actividad se define el propósito, alcance, intención de uso y usuario objetivo de la ontología. En esta actividad, también se especifican los recursos a ser utilizados para adquirir el conocimiento y para el desarrollo de la ontología.
- *Conceptualización.* En esta actividad se organiza y convierte la vista informal percibida del dominio en una especificación semi-formal utilizando un conjunto de representaciones intermediarias p. ej. diagrama de árbol, grafo, entre otros, que pueda ser entendida por los expertos del dominio y desarrolladores de ontologías [96].
- *Formalización.* En esta actividad se transforma el modelo conceptual en un modelo formal o semi-computable. Esto puede ser realizado, por ejemplo, al especificar el modelo usando primeramente un orden lógico.
- *Implementación.* Esta actividad tiene el objetivo de transformar la ontología previamente formalizada en un modelo computacional, codificado en un lenguaje de representación tal como OWL (*Ontology Web Language*).
- *Mantenimiento.* En esta actividad se corrige y actualiza la ontología.

En la siguiente sección se explican algunas recomendaciones encontradas en la literatura que buscan guiar y facilitar el diseño de los AVs para la terapia de rehabilitación motriz de extremidades superiores.

2.8 Taxonomía de las recomendaciones de diseño de los AVs para la rehabilitación motriz de extremidades superiores

En este trabajo de tesis se tomó en consideración los resultados del estudio de contexto de la terapia motriz ocupacional tradicional explicados en la sección 2.3 para entender y clasificar las recomendaciones de diseño encontradas en la literatura. Por lo que, con base en las tres etapas principales de la terapia motriz tradicional mencionadas en la sección 2.3, se creó una taxonomía de las recomendaciones de diseño.

La taxonomía propuesta se obtuvo usando teoría fundamentada [55]. De la codificación axial resultaron tres fases relacionadas con las actividades de la terapia. Las fases mapean las tres actividades principales que se realizan en una sesión de terapia ocupacional tradicional. En una sesión, en primer lugar el terapeuta ocupacional selecciona los ejercicios y artefactos a usar en la terapia. En segundo lugar, indica al paciente como realizar los ejercicios. Y en tercer lugar, anota y evalúa el resultado de los ejercicios. En la Figura 2.10, se presentan las tres fases de la taxonomía: 1) configuración del ejercicio, 2) asistencia en la ejecución del ejercicio y 3) control de resultados. A continuación se describe cada fase y los factores de diseño que la conforman.



Figura 2.10. Taxonomía para el diseño de AVs para la rehabilitación motriz superior de pacientes con ECV.

2.8.1 Configuración del ejercicio

Es fundamental realizar una configuración adecuada del ejercicio para ejecución de la terapia usando el AV. Para configurar el ejercicio, el desarrollador debe considerar que el terapeuta necesita adaptar la terapia con base en la capacidad del paciente. Al adaptar el ejercicio se pueden obtener resultados más efectivos. Enseguida se describen los factores que conforman esta fase.

- **Tipo de terapia-dispositivo-función.** Para configurar el AV, primeramente se debe determinar el tipo de terapia a aplicar. El tipo de terapia puede ser unilateral (usando una mano) o bilateral (usando las dos manos). Las estrategias de terapia pueden ser basadas en tareas, con restricción de movimiento, de espejo, por objetivos, entre otras [6]. Dependiendo de ello, el programador debe considerar el uso de uno o más dispositivos al mismo tiempo para la interacción del paciente con el AV. La selección se relaciona con la función a fortalecer en el paciente. Posibles funciones a recuperar son la fuerza muscular, el rango de movimiento o la coordinación vista-mano (precisión) [6]. Por ejemplo, Boulanger et al. [22] propone una terapia unilateral basada en tareas usando una interfaz táctil para mejorar el rango de movimiento de los pacientes.
- **Capacidades del paciente.** La clave principal en la rehabilitación motriz es alinear correctamente las habilidades de los pacientes con las tareas terapéuticas [3]. De esta manera, se permite mejorar sus capacidades residuales evitando fatiga y frustración [22]. Esta alineación depende de la parte afectada (p. ej. hombro, codo, muñeca o dedos) y el tipo de movimiento (simple o compuesto). Dependiendo de la lesión del paciente su movilidad puede ser nula (hemiplejia) o con disminución de fuerza (hemiparesia) [97]. Por ejemplo, Burke et al. [25] presenta un AV en donde se configuran parámetros como el brazo lesionado (izquierdo o derecho), la velocidad y la duración del ejercicio.
- **Relación reto-ejercicio.** En un AV se pueden ejecutar ejercicios lúdicos o formales. Los ejercicios varían dependiendo de la parte afectada y el nivel de complejidad. La relación ejercicio-reto requiere equilibrarse para asegurar una terapia exitosa [25]. La selección de ejercicios y el nivel de reto requiere ser una tarea sencilla para el terapeuta y el paciente [25], [26]. Por ejemplo, Annema et al. [98] utiliza un AV con varios juegos que pueden ajustarse de forma flexible en cualquier momento durante el juego.
- **Calibración del dispositivo y entrenamiento.** Una interfaz o dispositivo es utilizado para interactuar con el AV. En la literatura existen una gran variedad de dispositivos que proporcionan funcionalidad para fortalecer el rango de movimiento, la fuerza y la precisión de los pacientes, entre otros [99]. La

calibración del dispositivo depende del rango de movimiento, morfología y la fuerza máxima del paciente. El paciente necesita realizar un entrenamiento para determinar los valores adecuados. Este entrenamiento es un paso previo a la ejecución de la terapia que garantiza incrementar la motivación en el paciente. Por ejemplo, Burke et al. [25] determina la calibración del dispositivo con archivos preestablecidos de configuración o con nuevos valores calculados en ese instante. Una vez obtenida la configuración se ejecutan movimientos de entrenamiento para familiarizar al paciente con el ejercicio.

2.8.2 Asistencia en la ejecución del ejercicio

Esta fase agrupa factores de diseño que dan soporte al terapeuta y al paciente cuando ejecuta su terapia. A continuación se describe esta fase.

- **Adaptabilidad.** Es importante modificar de forma gradual el nivel de dificultad en el ejercicio. La graduación se realiza de forma automática por medio de un algoritmo de decisión o de forma asistida por el terapeuta al ejecutar el ejercicio [24]. Las características de los objetos -peso, tamaño, posición, cantidad, entre otros- pueden ser ajustados para garantizar un nivel adecuado de fuerza, duración, rango de movimiento; y para evitar que el ejercicio se vuelva aburrido o con un nivel de reto inadecuado. Por ejemplo, Alankus et al. [100] gradúa el rango de movimiento del ejercicio según la compensación detectada en el paciente.
- **Soporte local o remoto del paciente.** El lugar de uso del AV regularmente es el hogar del paciente o un centro de rehabilitación. El contexto depende del estado del paciente (agudo, subagudo, crónico) y del programa de terapia. De aquí que, si el paciente se encuentra en su hogar es importante darle soporte vía remota (tele rehabilitación). Por otro lado, se requiere soporte local si el AV se utiliza en un centro de rehabilitación [77]. Por ejemplo, en [98] es establecida la necesidad de pausar la ejecución de la terapia para proporcionar instrucciones extra o indicar al paciente el movimiento adecuado para garantizar la calidad del ejercicio.

- **Retroalimentación.** La combinación de la información visual, auditiva o háptica proporciona grandes beneficios en el nivel de inmersión y motivación en el ejercicio porque se utilizan más canales sensoriales en la interacción con el AV [25], [79]. Según Timmermans et al. [6] esta integración depende del nivel cognitivo del paciente. Por ejemplo, Kaber y Zhang [23] establece la mejora de la interacción con los objetos virtuales cuando se agregan reacciones de fuerza, además de dar soporte al movimiento espacial.
- **Visibilidad de desempeño e incentivos.** Es esencial mostrar en tiempo real cada patrón de movimiento del paciente y almacenarlo para su análisis posterior [98]. Además del movimiento, los incentivos pueden ser expresados en términos de iconos (figuras, números), barras de progreso, diálogos, vibración/fuerza, sonido, entre otros [100]. Por ejemplo, en [78] mensajes gratificantes son desplegados como incentivos.

2.8.3 Control de los resultados

Deben interpretarse los resultados actuales e históricos del desempeño del paciente para la toma de decisiones al terminar la ejecución de la terapia. Por lo que esta fase la conforman la presentación y distribución de resultados. Enseguida se describen los factores.

- **Progreso del paciente.** El progreso del paciente necesita mostrarse de forma clara y sencilla de interpretar por los terapeutas para evitar confusiones en la interpretación de resultados. El uso de gráficas o tablas facilitan su entendimiento. Por ejemplo, Annema et al. [98] propone describir al terapeuta el progreso del paciente según la función (p. ej. rango de movimiento, fuerza).
- **Distribución de la información.** Además de almacenar y generar reportes del progreso del paciente, se debe compartir la información con el equipo que toma las decisiones (p. ej. psicólogos, médicos especialistas en rehabilitación, terapeutas físicos). Dependiendo de la ubicación de los especialistas, la información se puede compartir de forma local o remota. Por ejemplo, Ines y Abdelkader [78] propone monitorear remotamente el progreso y modificar en línea el programa de terapia del paciente que usa el AV desde su casa.

2.9 Resumen del capítulo

En este capítulo se ha dado una descripción de los principales conceptos teóricos para el diseño de AVs con retroalimentación háptica para pacientes con ECV. Como parte del resultado del análisis se obtuvo lo siguiente:

- Se describieron las características de la ECV y sus implicaciones.
- Se describieron los diferentes tipos de intervenciones para la rehabilitación de los pacientes con ECV.
- Se presentaron los resultados de un estudio de contexto el cual permitió identificar las características básicas de la terapia de rehabilitación motriz ocupacional tradicional.
- Se describieron las ventajas de utilizar AVs con retroalimentación háptica para la rehabilitación motriz de extremidades superiores para pacientes con ECV.
- Se explicaron las 4 áreas principales de investigación háptica para el desarrollo de los AVs.
- Se describieron diferentes conceptos usados HCI para el diseño de productos.
- Se explicaron diversas metodologías para la construcción de ontologías, en particular, se describió la metodología METHONTOLOGY.
- Se presentó una taxonomía para el diseño de los AVs que integra recomendaciones encontradas en la literatura.

En el siguiente capítulo se describen los trabajos relacionados a esta investigación encontrados en la literatura.

Capítulo 3

Trabajos relacionados

En el capítulo anterior se describieron algunas de las características de la ECV, los tipos de intervenciones para la rehabilitación motriz y las principales actividades de la terapia motriz ocupacional tradicional. Además, se explicó cómo el uso de AVs con retroalimentación háptica ha fortalecido las intervenciones de rehabilitación para los pacientes con ECV. Se describieron algunos conceptos para el diseño de productos. Además, se describieron algunas metodologías para la construcción de ontologías. Finalmente, se describió una taxonomía que integra las recomendaciones de diseño para AVs de rehabilitación motriz de extremidades superiores encontradas en el análisis de la literatura. Dicho análisis sirvió como soporte para establecer el marco teórico y entender los tipos de recomendaciones para el diseño de los AVs.

En este capítulo se presenta un análisis basado en una serie de trabajos que aportan elementos que sirven como complementos para establecer ideas de diseño para los AVs. Por un lado, se presentan las guías del dominio clínico para la prevención, la rehabilitación y el seguimiento de la rehabilitación motriz de pacientes con ECV. Por otro lado, se explican las taxonomías y los modelos encontrados en la literatura para el diseño de AVs o juegos serios de rehabilitación motriz de extremidades superiores. Además, se mencionan algunas ontologías relacionadas al diseño de los AVs, como p. ej. el diseño de AVs o juegos serios de uso general, enfermedades neurológicas, expediente médico y dispositivos de asistencia para la rehabilitación motriz.

Por último, se explican una serie de hallazgos identificados con base en la serie de guías encontradas en el dominio de rehabilitación, las taxonomías o modelos relacionados para el diseño de los AVs y otras ontologías relacionadas al diseño de los AVs.

3.1 Guías para la prevención, rehabilitación y seguimiento de pacientes con ECV

Por un lado, tenemos algunas recomendaciones propuestas por grupos de investigación del dominio de rehabilitación quienes buscan mejorar las intervenciones, el tiempo de cuidado

de los pacientes, el clasificar a los pacientes con base a su nivel de afectación, el reducir admisiones recurrentes de los pacientes y el utilizar mejor los servicios de salud. Por ejemplo, la Asociación de Americanos con Accidente cerebrovascular (*American Stroke Association: ASA*) y la Asociación Americana del Corazón (*American Heart Association: AHA*) proponen una guía que tiene los objetivos de 1) facilitar la asistencia del proceso de cuidado de los pacientes basado en evidencia, 2) diseñar esquemas para recuperar la máxima funcionalidad e independencia, y 3) mejorar la salud y la calidad de vida de los pacientes y sus familias [27].

La selección del plan de tratamiento involucra una evaluación efectiva del estado del paciente. Para lo anterior, en McDonnell et al. [28] se propone un algoritmo que involucra la evaluación de 18 afectaciones críticas para las funciones de extremidades superiores de los pacientes con ECV. Esta clasificación recomienda ejercicios apropiados de tareas específicas con base al nivel de afectación. El algoritmo se basa en las tres dimensiones establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para las ECV: *discapacidad* - nivel función y estructura del cuerpo-, *actividad* -nivel de la persona es términos de sus actividades de la vida diaria- y *entorno* en el cual el paciente actúa y participa.

El modelo propuesto en McDonnell et al. [28] se integra el modelo de la OMS junto con las recomendaciones de expertos clínicos y educadores para clasificar las principales afectaciones de una extremidad superior con hemiparesia. La Figura 3.1 muestra un ejemplo de cómo el algoritmo clínico fue diseñado para ubicar el tipo de tratamiento para la rehabilitación de las extremidades superiores, considerando su estructura, función y restricción de la actividad. Por último, de acuerdo a cualquiera de las categorías presentadas en la Figura 3.1 los autores proponen una serie de ejercicios basados en tareas con el fin de promover el aprendizaje motriz.

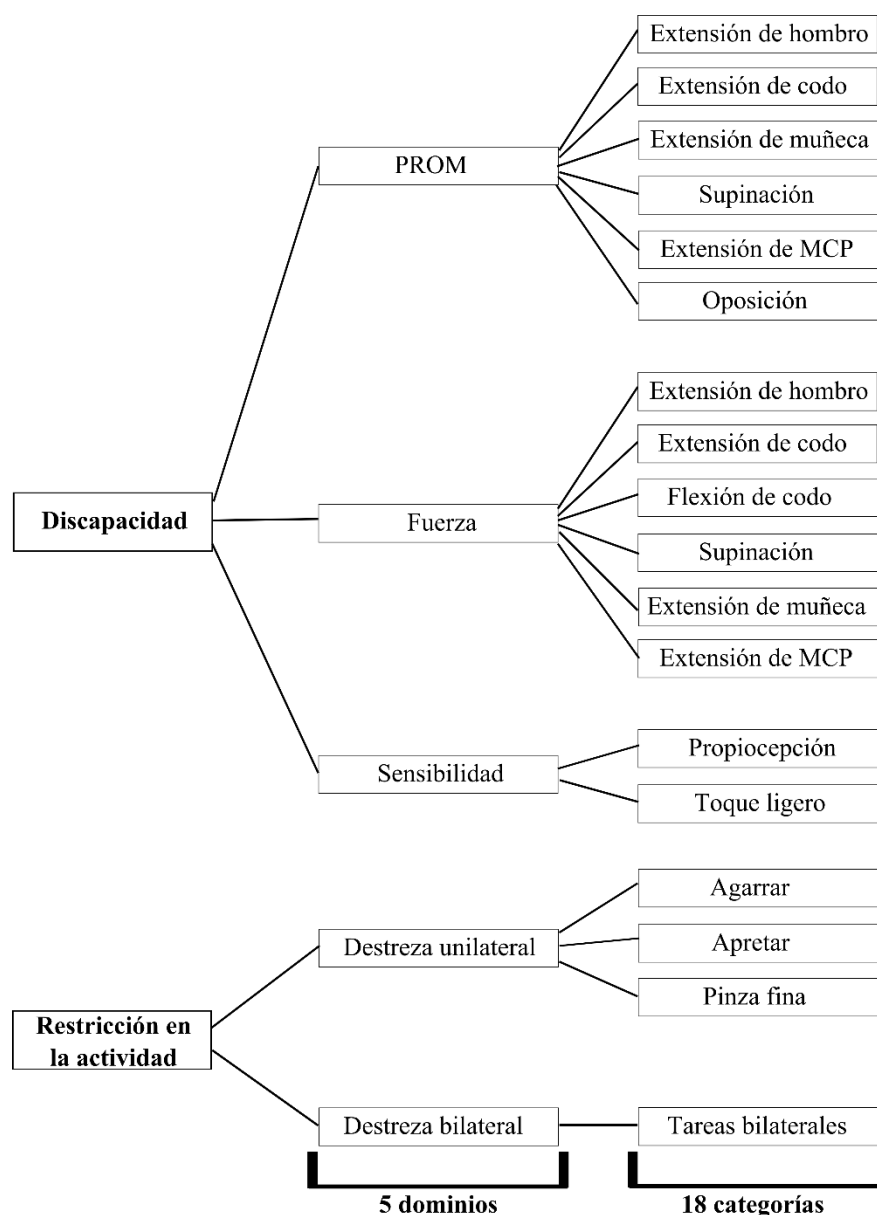


Figura 3.1. Ejemplo del algoritmo clínico para ubicar la afectación en las extremidades superiores que propician el tipo de intervención o tratamiento de rehabilitación. Rango de movimiento pasivo: PROM, Articulación metacarpo falángica: MCP (tomada de [28]).

Respecto a las *intervenciones de rehabilitación motriz* de las extremidades superiores la ASA y AHA recomiendan lo siguiente:

1. La recuperación funcional de las extremidades superiores debe consistir en la práctica de tareas funcionales que enfatizan la repetición y dificultad progresiva.
2. El tratamiento debe adecuarse de forma individual a los pacientes, considerando la intervención más apropiada, que adhiera al paciente, esté disponible y sea accesible.

Esta recomendación se resalta también en la guía de rehabilitación neurocognitiva propuesta por Guilmette y Kennedy [29].

3. La terapia de restricción de movimiento para individuos con al menos 10 grados de extensión en los dedos, el pulgar y la muñeca.
4. La terapia de movimiento asistido con robots como un complemento a la terapia convencional (tradicional) en pacientes con déficits en la función del brazo para mejorar de forma entrenada las habilidades motoras en las articulaciones.
5. Práctica bilateral para mejorar las funciones de las extremidades superiores.
6. Tratamiento con estimulación eléctrica funcional para pacientes que tienen problemas en las contracciones de los músculos de sus extremidades superiores, específicamente para pacientes con discapacidad en el codo/muñeca.
7. Tratamiento de estimulación eléctrica funcional para pacientes que tienen subluxación de hombro.
8. Considerar la combinación de estimulación eléctrica funcional en la práctica mental con la práctica de tareas funcionales repetitivas e intensas.
9. Considerar el fortalecimiento de ejercicios además de la práctica de tareas funcionales.
10. Considerar la realidad virtual como contexto de práctica.
11. No existe evidencia suficiente para recomendar la terapia de espejo.

Por otro lado, el Instituto Nacional de Salud y Excelencia de Cuidado (NICE, por sus siglas en inglés) proporciona también una guía clínica para las *intervenciones en la rehabilitación* de los pacientes. Esta guía fue resumida en [101] para generar una vista concisa para cuatro temas principales: 1) la organización del cuidado social y de salud para la rehabilitación después de una ECV, 2) la planeación y entrega de la rehabilitación, 3) la información de apoyo y soporte, y 4) el soporte social y de salud a largo término. En particular, para la organización del cuidado social y de salud, recomiendan individualizar la *documentación del paciente* con la información mínima siguiente: datos demográficos básicos incluyendo detalles de un contacto, información relevante del diagnóstico médico, la lista de medicamentos actuales incluyendo alergias, evaluaciones estándares, metas de rehabilitación personales, notas del progreso del grupo multidisciplinario que lo atiende, un contacto clave del grupo de rehabilitación para coordinarse en las necesidades del personal

de cuidado de la salud del paciente, información de los planes de cuidado de su salud y sociales.

Por su parte, en McHugh [102] se establece una serie de guías a considerar en el *tratamiento de los pacientes*. Las guías explican componentes para el tratamiento de los pacientes con base en su estado de la ECV: leve, moderado o severo. La Tabla 3.1 presenta el tipo de tratamiento recomendado para los pacientes según la evaluación realizada con un panel de expertos en rehabilitación.

Tabla 3.1. Tipo de tratamiento a pacientes con ECV con base en su nivel de afectación leve, moderado o severo (adaptada de [102]).

Nivel de afectación de la ECV	Participación más activa del paciente	Participación moderada del paciente	Participación no activa del paciente
Leve	• Ejercicios activos/ejercicios basados en sillas • Actividades funcionales/de la vida diaria • Habilidades motoras finas • Fortalecimiento de fuerza • Repeticiones de tareas específicas • Entrenamiento bilateral	• Estimulación sensorial • Ayuda en la postura y posición	• El terapeuta como facilitador/movimiento pasivo • Movilización suave
Moderado	• Ejercicios activos • Actividades funcionales/de la vida diaria • Fortalecimiento de fuerza • Repeticiones de tareas específicas • Entrenamiento bilateral	• Estimulación sensorial • Imágenes mentales • Extensión de las habilidades del paciente por el terapeuta • Ayuda en la postura, posición	• El terapeuta como facilitador/movimiento pasivo • Movilización suave • Entablillado
Severo	• Ejercicios activos/ejercicios basados en sillas • Actividades	• Estimulación sensorial • Ayuda en la postura,	• El terapeuta como facilitador/movimiento pasivo • Movilización

funcionales/de la vida diaria	posición	suave
		• Entablillado

Con base en el tipo de cuidado que proporcionan las guías para pacientes con ECV, existen otras recomendaciones de algunas organizaciones reconocidas a nivel mundial p. ej. AMA (*American Stroke Association*), ASA (*Australian Stroke Association*), CHEP (*Canadian Hypertension Education Program*), CCS (*Canadian Cardiovascular Society*), y CDA (*Canadian Cardiovascular Society*), entre otras [103], [104]. De acuerdo a estas organizaciones, las mejores prácticas para la rehabilitación de pacientes con ECV se listan a continuación:

- Evaluación inicial para la rehabilitación del paciente con ECV. Todos los pacientes merecen tener una evaluación inicial oportuna lo más rápido posible después de su admisión. Lo anterior, incluye la evaluación médica y la evaluación funcional del paciente.
- Provisión oportuna de la rehabilitación. Todos los pacientes deben ser admitidos en un hospital en donde sean tratados para iniciar su rehabilitación por medio de un equipo multidisciplinario.
- Identificación oportuna de los componentes de la rehabilitación. Todos los pacientes deben iniciar su terapia de rehabilitación lo antes posible una vez que han alcanzado una estabilidad médica.
- Identificación y administración de la depresión post ECV. Todos los pacientes con ECV deben ser considerados para prevenir el alto riesgo de depresión. El análisis de su depresión debe ser considerado desde el inicio y evaluado en intervalos de 3 meses durante todo el proceso de rehabilitación.
- Evaluación y tratamiento del dolor muscular. Es necesario identificar los factores que propician dolor para ser propiamente administrados. La protección de las articulaciones son unas de las estrategias más importantes para minimizar el trauma.
- Rehabilitación basada en la comunidad. Los sobrevivientes de una ECV deben continuar teniendo acceso a cuidado especializado y rehabilitación después de dejar el hospital.

En esta sección, se explicaron algunas de las recomendaciones o guías identificadas, propuestas en el dominio clínico por asociaciones encargadas de la prevención, la rehabilitación y el seguimiento de pacientes con ECV.

3.2 Diseño de terapias de rehabilitación

La rehabilitación después de una ECV ha incluido en los últimos 20 años métodos de rehabilitación analítica que incluyen enfoques de entrenamiento orientado a tareas [6]. Los métodos analíticos se ocupan de movimientos articulares localizados que no están vinculados a habilidades, sino a nivel funcional [3]. El enfoque orientado a tareas incluye el entrenamiento de las habilidades y actividades con el fin de incrementar la participación de los pacientes. Varios autores utilizan métodos de rehabilitación que incluyen la repetición de movimientos significativos y atractivos para inducir cambios en la corteza cerebral que apoyan la recuperación motriz (neuropasticidad) [52]. Enseguida se explican algunos enfoques de terapia física activa.

Para determinar la evidencia de las intervenciones de terapia física activas dirigidas a mejorar el resultado funcional después de la ECV, Van Peppen et al. [105] realizó una revisión sistemática de la literatura que incluye 123 ensayos clínicos aleatorios controlados y 28 ensayos clínicos controlados. Dentro de sus principales hallazgos, determinó que existe mayor evidencia del impacto positivo en la recuperación funcional en los enfoques de terapia activa: entrenamiento orientado a tareas, terapia de movimiento inducido restringido, y entrenamiento bilateral de brazos [105].

El *entrenamiento orientado a tareas* representa un entrenamiento repetitivo de tareas funcionales (relacionadas con las habilidades). El entrenamiento orientado a las tareas ha sido probado clínicamente principalmente para el entrenamiento de la locomoción [99] y el equilibrio [6]. Sin embargo, también se sabe que afecta positivamente a la mano brazo de recuperación de la función, el control del motor y la fuerza en los pacientes con accidente cerebrovascular [106]. El valor de la formación orientada a las tareas se ve en el hecho de que el movimiento se define por su contexto ambiental. Los pacientes aprenden resolviendo problemas que son específicos de cada tarea, tales como ajustes locomotores anticipativos, procesamiento cognitivo y búsqueda de estrategias de movimiento orientadas a objetivos eficientes [3]. Los efectos del entrenamiento son específicos de la tarea, con efectos reducidos en tareas no entrenadas que son similares [107]. Al mismo tiempo, los

impedimentos que obstaculizan el movimiento funcional se resuelven o se reducen. Todos estos aspectos contribuyen a estrategias de movimiento más eficientes [6]. Los enfoques de formación orientados a las tareas son coherentes con la clasificación de las afectaciones de los pacientes señalada por la OMS [42] a medida que se aborda el nivel de función, así como el nivel de actividad y participación.

La *terapia de movimiento inducido con restricción* (CIMT) es un enfoque de entrenamiento especializado orientado a la tarea que ha demostrado mejorar la función del brazo para pacientes con ECV a través de varios ensayos clínicos aleatorios que involucran a una gran cantidad de pacientes [108]. Se ha encontrado que los efectos de CIMT han logrado persistir incluso 1-2 años después de que el entrenamiento se detuvo [109]. La CIMT comprende varios componentes del tratamiento, como el entrenamiento funcional del brazo afectado con niveles de dificultad gradualmente crecientes, la inmovilización del brazo no afectado del paciente durante el 90% de las horas de vigilia y un enfoque en el uso del brazo más afectado en la vida cotidiana [108].

Por otro lado, el *entrenamiento bilateral del brazo* incluye el movimiento activo simultáneo del parético y del brazo no afectado [110]. El entrenamiento bilateral del brazo es un método de entrenamiento reciente que, a través de ensayos clínicos aleatorizados, ha probado aumentar la amplitud de movimiento, la fuerza de agarre y la destreza del brazo parético [111], [112].

Además, un *entrenamiento dirigido a objetivos* incluye varios componentes esenciales: 1) la selección del objetivo del paciente a partir de una elección guiada para ser "SMART" (Específico, Medible, Alcanzable, Realista y Tiempo especificado); 2) el análisis del desempeño de la tarea del paciente con respecto a la meta seleccionada; 3) la identificación de las variables que limitan el desempeño del paciente y la identificación de las restricciones del paciente como base de la selección de la estrategia de tratamiento; 4) el análisis de la intervención y el desempeño del paciente conducen a una respuesta estructural que apoya el aprendizaje motor; 5) la participación consciente del paciente para aprender de la retroalimentación mediante la restauración de procesos cognitivos asociados con el movimiento funcional; y 6) la búsqueda de estrategias para determinar individualmente cuáles son las soluciones más eficaces [113]. Para obtener más

información acerca de la fijación de metas y la escala de logro de metas, los autores se refieren a Kiresuk et al. [114].

Una vez presentados algunos de los enfoques de terapia de rehabilitación activa encontrados en la literatura. Enseguida explicamos los modelos o las taxonomías encontradas en la literatura que tienen el objetivo de guiar el diseño de los AVs o juegos serios utilizados para la rehabilitación motriz de extremidades superiores de los pacientes con ECV.

3.3 Taxonomías y modelos para el diseño de AVs o juegos serios para la rehabilitación motriz de extremidades superiores

Se encontró en la literatura otras taxonomías y modelos de diseño para los AVs desde los enfoques del tratamiento, necesidades de los usuarios y las características más importantes de los juegos serios utilizados en rehabilitación. Por un lado, en Rego et al. [115] se clasifican las características más importantes de los juegos serios en rehabilitación con base en una revisión de literatura. Según Rego et al. [115] las características son: área de aplicación, tecnología de interacción, número de jugadores, colaboración o competencia, género del juego, adaptabilidad, monitoreo del progreso, desempeño y retroalimentación.

Por otro lado, en Mader et al. [116] se propone un modelo para el diseño de juegos serios para la terapia motriz desde la perspectiva del usuario, el juego y la terapia. Para el usuario se consideran los factores de rango de edad, género y condiciones particulares (p. ej. físicas) y habilidades. En el juego, se incluyen los factores de entrada del sistema, metas, retroalimentación (desempeño o progreso), puntaje (desempeño del jugador) y dificultad. Por último, en la terapia se indica si se esperan resultados a corto o largo plazo y cómo comprobar los resultados.

Además, en Goude et al. [117] se define un modelo que se concentra en los patrones de las diferentes funciones a recuperar en los pacientes (p. ej. fuerza muscular, coordinación). Por ejemplo, para la función de la fuerza muscular identifican como patrones el nivel de dificultad correcto, el nivel de inmersión y la fuerza aplicada mediante dispositivos hápticos. Además, en la coordinación determinan patrones para dos categorías: escala y tiempo.

Enseguida explicamos algunos modelos relacionados al diseño AVs o juegos serios de uso general, enfermedades neurológicas, expediente médico electrónico y de dispositivos de asistencia en la rehabilitación.

3.4 Otros modelos relacionados al diseño de los AVs

En la búsqueda de la literatura no se encontró modelos representados formalmente, ésto es, ontologías que integren las recomendaciones de diseño para los AVs con base en el dominio de rehabilitación motriz de extremidades superiores. Sin embargo, se encontraron: 1) ontologías genéricas para facilitar el modelado de los objetos de los AVs, 2) ontologías para enfermedades neurológicas, 3) ontologías para el expediente médico electrónico, y 4) ontologías para el diseño de dispositivos de asistencia en la rehabilitación. Enseguida se explican estas ontologías.

3.4.1 Ontologías genéricas para facilitar el modelado de los objetos en los AVs

Pellens et al. [118] propone VR-WISE una ontología que permite modelar los objetos que conforman el AV utilizando el conocimiento del tipo eventos que van a suceder en el ambiente y las posibles colisiones entre objetos. Pittarello y Faveri [119] plantea una ontología para la descripción semántica del AV mediante escenarios descritos en el lenguaje X3D. Además, en Tang and Hanneghan [120] se presenta una ontología que permite documentar los elementos de un juego serio, como p. ej. el escenario del juego, el objetivo, la estructura del juego, los jugadores y los objetos que incluye el juego serio. Por su parte, en Missikoff et al. [121] se propone una ontología para la construcción y mantenimiento de AVs colaborativos que puede ser utilizada en la industria, aspectos logísticos o empresariales. Por último, en Pelkey et al. [122] se propone una ontología para poblar AVs con base en la relación existente entre los objetos de la escena.

3.4.2 Ontologías para enfermedades neurológicas

Jebsen et al. [123] propone una ontología de alto nivel que define tres enfermedades neurológicas: Alzheimer, esclerosis múltiple y ECV. Ésta ontología tiene el objetivo de representar para cada enfermedad su origen ambiental, genético o molecular, el proceso de su etiología y el curso de progreso, su presentación clínica y fenotipos; incluyendo los signos asociados, síntomas, síndromes, criterios de diagnóstico, tratamiento y métodos de

evaluación. La ontología propuesta por Jebson et al. [123] es una extensión de la Ontología General de la Ciencia Médica (OGMS) que representa entidades del dominio de medicina y enfermedades que integran datos biomédicos [124].

3.4.3 Ontologías para el expediente médico electrónico

Se encontró la representación ontológica propuesta por Zhao and Zhang [125] del expediente médico electrónico y la capacidad de razonamiento para determinar el doctor que asistió efectivamente un tratamiento. Además, en Devarakonda y Mehta [126] se establece una ontología para facilitar el acceso al expediente médico electrónico para la toma de decisiones en el cuidado de los pacientes. Por último, en Issa et al. [127] se incorpora el uso de ontologías para facilitar el acceso a la información del paciente para conocer sus tratamientos, pronósticos, y factores de riesgo, entre otros.

3.4.4 Ontologías para el diseño de dispositivos de asistencia a la rehabilitación motriz

Dogmus et al. [128] presenta la ontología REHAB-ONTO para el diseño de dispositivos robóticos utilizados en la rehabilitación física de extremidades superiores o inferiores. REHAB-ONTO describe las propiedades de los dispositivos robóticos, como por ejemplo el tipo de actuador, el mecanismo de movimiento, la población que va a usar el dispositivo, y el tipo de movimiento, entre otros.

3.5 Hallazgos identificados

Después de haber analizado la literatura se han encontrado una serie de elementos que pueden ser útiles para el diseño de los AVs para la rehabilitación motriz de extremidades superiores de pacientes con ECV.

Por ello, podemos afirmar que los trabajos del dominio clínico aportan las siguientes ideas para el diseño de los AVs:

- Para la determinación y seguimiento de la rehabilitación del paciente es necesario considerar un programa de la terapia que sirva como guía para *configurar el AV*. Lo anterior, debido a la importancia de determinar las necesidades de rehabilitación, los escenarios de rehabilitación y el plan de tratamiento para cada intervención. Estas intervenciones se irán modificando con base en la evaluación del progreso y la adherencia del paciente en la intervención. Lo anterior es argumentado en la sección 3.3.

- El *tipo de intervención (tratamiento de terapia de rehabilitación)* de la extremidad superior debe adecuarse –*adaptarse*– de forma individual a los pacientes. Lo anterior, con base en la guía para la rehabilitación neurocognitiva explicada en la sección 3.1, la Tabla 3.1 y las diferentes intervenciones explicados en la sección 3.2.
- Es necesario considerar el *nivel de afectación* de la extremidad superior para la determinar la *función* a rehabilitar, la *selección del ejercicio*, el *tipo de movimiento* y el *dispositivo de interacción* a usar en la *configuración del ejercicio* con el AV. Esto fue explicado con base al algoritmo de selección de intervención mostrado en la Figura 3.1 de la sección 3.1.
- Para la *configuración del AV* es necesario considerar la *documentación del paciente* y su *nivel de afectación en la ECV*, donde se establezca claramente información básica como los datos demográficos incluyendo detalles de su diagnóstico médico y demás enfermedades asociadas. Lo anterior se explicó en la sección 3.3.
- Además del paciente, los posibles *usuarios del AV* serán un *grupo de expertos multidisciplinarios* que incluyen al médico especialista en rehabilitación, el terapeuta físico u ocupacional, el personal de apoyo y los familiares o cuidadores del paciente.

Por lo que, con base en las guías del dominio clínico explicadas en la sección 3.1 y las diferentes terapias de rehabilitación descritas en la sección 3.2, se encontró que las taxonomías o modelos existentes para el diseño de los AVs explicados en la sección 3.3 no consideran los siguientes aspectos:

- Información del estado actual del paciente y su ECV. Con esta información el terapeuta puede realizar modificaciones informadas respecto progreso del paciente que garantice una interacción adecuada en el AV.
- El tipo de intervención o terapia a aplicar con base en el estado actual del paciente. De acuerdo al estado del paciente en su ECV es importante individualizar el tipo de intervención a proporcionar para el paciente.
- La selección y la calibración adecuada del dispositivo de interacción a utilizar en el ejercicio. La identificación, el entrenamiento y el uso adecuado del dispositivo de

interacción es parte fundamental de la adherencia y aprendizaje motriz a lograr mediante el uso del AV.

- La modificación gradual del nivel de reto del ejercicio del paciente con base en su progreso. Esto genera evidencia del progreso que se obtiene cuando se usa un entorno virtual para la ejecución de los ejercicios de rehabilitación de los pacientes.
- El tipo de adaptabilidad de los ejercicios según las necesidades específicas de la intervención. La determinación manual o automática de los mecanismos utilizados para adecuar el nivel de reto de los ejercicios es parte fundamental para garantizar una interacción eficiente en el AV.
- El tipo de soporte a proporcionar al paciente al usar el AV. Cuando el paciente siente que además de ser supervisado en el centro de rehabilitación tiene un apoyo remoto por parte de los especialistas, es un aspecto muy importante para su proceso de rehabilitación. Lo anterior sugiere un respaldo que busca mantener al usuario seguro al interactuar con el AV.
- El mostrar y distribuir el progreso del paciente con base al perfil del grupo multidisciplinario que utiliza el AV. La toma de decisiones informada respecto al ajuste de la intervención o tratamiento del paciente es un aspecto esencial en el proceso de rehabilitación motriz.

Hasta este punto se han abordado las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuáles son las guías del dominio clínico que pueden aportarnos ideas para el diseño de los AVs?, ¿Cuáles son las recomendaciones de diseño existentes en la literatura para el diseño de los AVs?, ¿Qué taxonomías o modelos de diseño hay en la literatura para el diseño de los AVs?

Con base al entendimiento de la ECV, la rehabilitación después de una ECV y la terapia de rehabilitación motriz ocupacional tradicional explicados en el capítulo 2 y los hallazgos planteados en este capítulo, se cuenta con elementos para clasificar un conjunto de factores para el diseño de los AVs. Por ello, es necesario abordar en el siguiente capítulo las preguntas: ¿cómo y qué tipo de factores se necesitan para conformar un modelo de diseño basado en las ideas generadas con las guías del dominio clínico, las taxonomías y las recomendaciones de diseño encontradas en la literatura?, ¿cómo es que estos factores se alinean con las características de los AVs identificados para la rehabilitación motriz de

extremidades superiores? y ¿cuáles son las semejanzas de los factores de diseño del modelo respecto a los principios identificados de aprendizaje motriz y neuroplasticidad?

3.6 Resumen del capítulo

En este capítulo se han descrito una serie de trabajos relacionados con el área de rehabilitación motriz de extremidades superiores para pacientes que han sufrido una ECV, de los cuales se han obtenido hallazgos importantes para guiar una propuesta de modelo para el diseño de AVs. Como parte de los resultados de este análisis se obtuvo lo siguiente:

- Se describieron las guías identificadas en el dominio clínico para mejorar la prevención, rehabilitación y seguimiento de la rehabilitación motriz de pacientes con ECV.
- Se describieron los diseños de terapias identificados para la rehabilitación motriz de extremidades superiores.
- Se explicaron las taxonomías y modelos de otros investigadores para el diseño de los AVs o juegos serios de rehabilitación motriz.
- Se especificaron una serie de ontologías relacionadas al diseño de los AVs.
- Se enlistaron una serie de hallazgos e ideas de diseño para los AVs de rehabilitación motriz de las extremidades superiores de los pacientes con ECV.

En el siguiente capítulo se presenta un modelo para el diseño de los AVs, el cual fue definido como resultado del entendimiento de la rehabilitación motriz ocupacional tradicional y la taxonomía inicial definida en el capítulo 2, la revisión de la literatura de las recomendaciones de diseño y los hallazgos obtenidos de este capítulo.

Capítulo 4

Modelo de diseño

En los capítulos anteriores se estableció en qué consiste la rehabilitación de los pacientes después de una ECV y cómo se han utilizado los AVs como una herramienta de apoyo en el proceso de rehabilitación motriz de extremidades superiores. Además, se describieron diversas guías, estrategias para el diseño de terapias de rehabilitación, taxonomías y modelos de otros trabajos de investigación que contribuyen en la generación de ideas para la definición de los factores de diseño del modelo propuesto en este trabajo.

Como resultado de lo anterior, se establecieron un conjunto de hallazgos que motivan la inclusión de factores que consideren la forma en que se lleva a cabo el proceso de rehabilitación. De esta manera, en este capítulo se presenta un modelo de diseño basado en: i) la iteración de la taxonomía presentada en el Capítulo 2 (ver sección 2.8), ii) los hallazgos del Capítulo 3 (sección 3.5) y iii) la revisión de la literatura de recomendaciones de diseño para los AVs.

Como se indicó en la sección 2.6 del Capítulo 2, un modelo de diseño es un conjunto de principios, reglas y propiedades que guían el diseño de una interfaz [129]. El modelo de diseño inicial propuesto en este capítulo fue validado mediante la revisión de la literatura, usando dos procedimientos: i) la comparación de sus factores con los principios de aprendizaje motriz y neuroplasticidad identificados y ii) la aplicación de los factores para clasificar AVs identificados en la literatura. Enseguida se explica a detalle la metodología utilizada para la creación del modelo de diseño semi-formal propuesto en este capítulo.

4.1 Metodología

Se identificaron las recomendaciones de diseño mediante una revisión de la literatura. Para lo anterior, se realizó una búsqueda en bibliotecas especializadas incluyendo, ACM, IEEE, Springer, Elsevier, EBSCO y Scopus. Las palabras clave utilizadas en la búsqueda fueron: recomendaciones, principios, criterios, ontología, usabilidad, taxonomía, diseño, guía de diseño, ambiente virtual, enfermedad cerebrovascular y terapia motriz de extremidades superiores. Los criterios de inclusión usados fueron: i) AV para pacientes con ECV, ii) AV

para la rehabilitación motriz de extremidades superiores, y iii) recomendaciones que fueron generadas con base en un estudio de contexto o evaluación de usabilidad del AV. En total se encontraron 1590 artículos después de remover los duplicados (ver Figura 4.1). De los 1590, 1212 artículos fueron excluidos por estar enfocados en otras disciplinas (p. ej. diseño de dispositivos, cómputo en la nube). Además, fueron excluidos 363 artículos de los 378 restantes por no cumplir con los tres criterios de inclusión (p. ej. AV para pacientes con otras patologías). Finalmente, 15 artículos fueron considerados para el análisis.

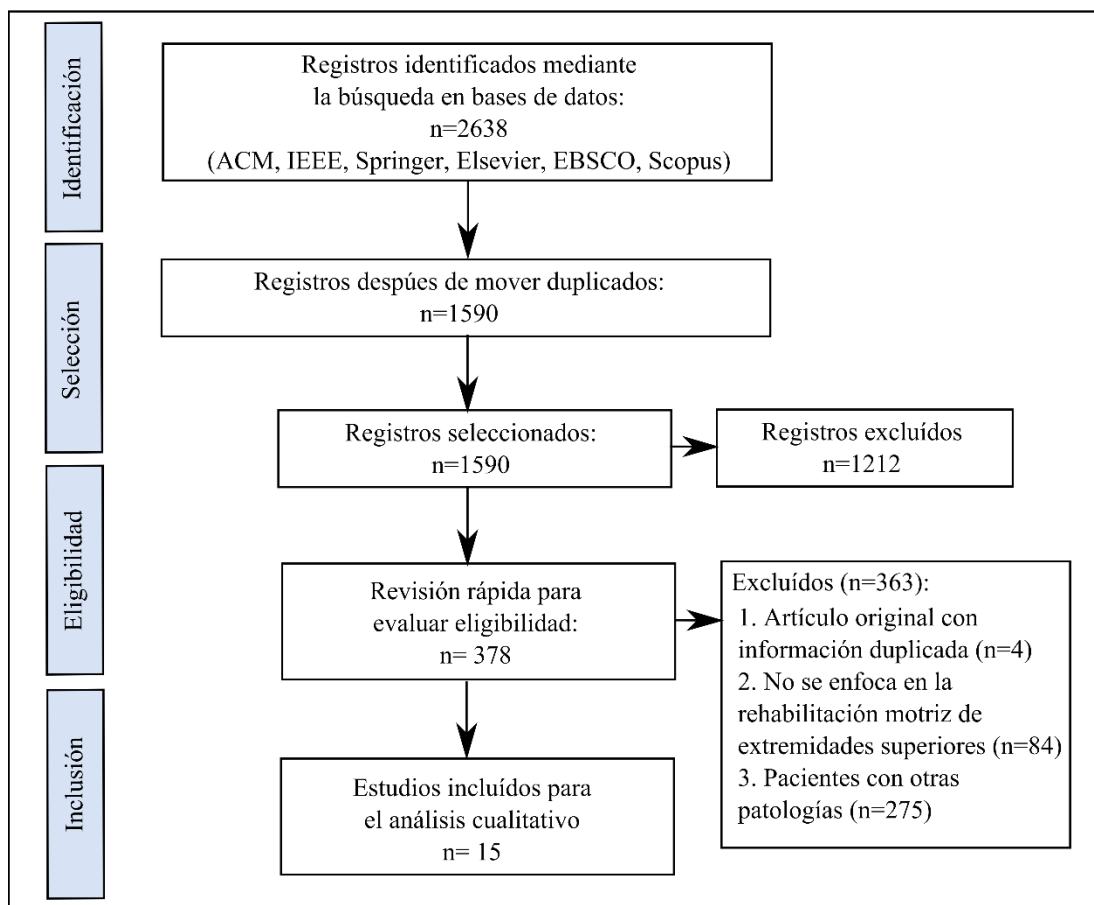


Figura 4.1. Flujo de la revisión de la literatura de las recomendaciones de diseño (adaptada de [130]).

Con base en los resultados de la revisión de la literatura, fueron identificados principios, criterios, implicaciones, guías de diseño criterios, factores humanos o de usabilidad y recomendaciones de diseño (ver Figura 4.2) [3], [6], [8], [22]–[26], [77]–[80], [97], [98], [100]. Según los resultados obtenidos, una de las recomendaciones encontradas en la revisión de la literatura es llamada guía (ver [6]), sin embargo, la forma en que se presenta no satisface el nivel de detalle de acuerdo a su definición. Por lo tanto, independientemente

del nombre asignado por sus autores, en esta tesis se considera que las recomendaciones tienen un objetivo común: determinar factores de diseño de los AVs para la rehabilitación motriz de extremidades superiores.

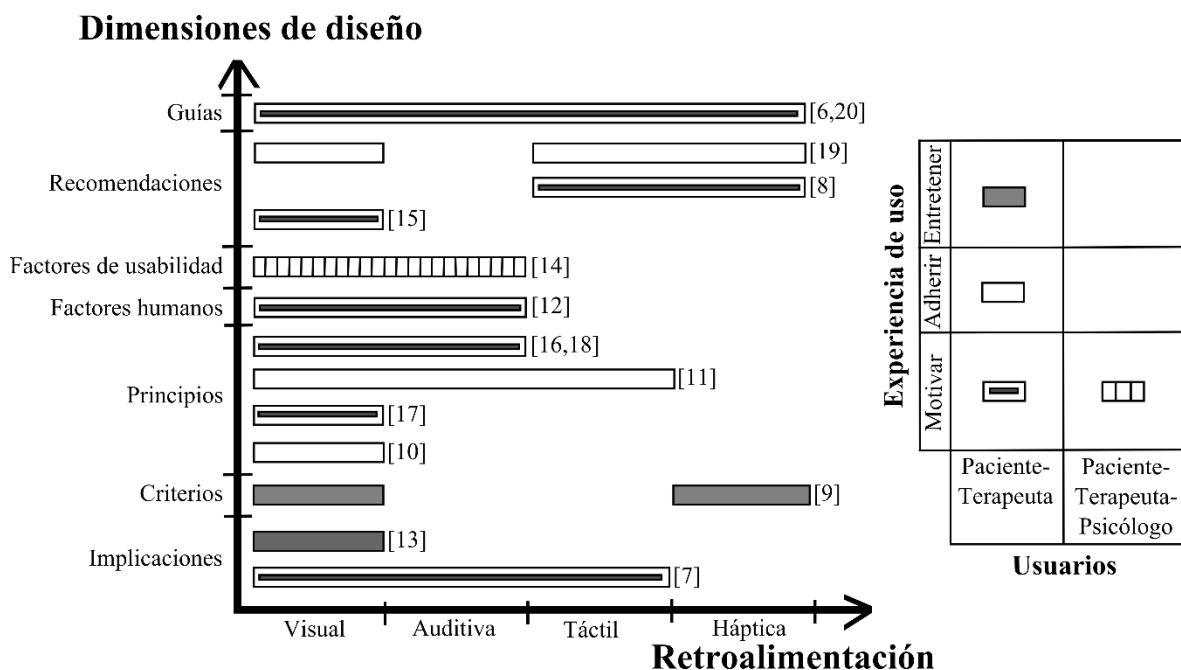


Figura 4.2. Recomendaciones de diseño para el diseño de AVs para la rehabilitación motriz de extremidades superiores.

4.2 Modelo de diseño

Como se menciona anteriormente, el modelo de diseño propuesto en esta investigación toma como base: i) la taxonomía presentada en la sección 2.8 del Capítulo 2, ii) los hallazgos de la sección 3.5 del Capítulo 3 y iii) las recomendaciones de diseño mostradas en la Figura 4.2. Con base en lo anterior, se identifican tres categorías utilizando codificación axial de acuerdo a las actividades de la terapia ocupacional tradicional. En primer lugar, el terapeuta ocupacional selecciona repetidamente los ejercicios y artefactos a utilizar durante la sesión de terapia. En segundo lugar, el terapeuta le indica al paciente cómo ejecutar los ejercicios y supervisa que se lleven a cabo correctamente. Por último, el terapeuta evalúa y almacena el resultado del desempeño de los ejercicios del paciente. En la Figura 4.3 se presentan las tres fases del modelo: 1) *configuración del ejercicio*, 2) *asistencia en la ejecución del ejercicio*, y 3) *administración de los resultados*. Cada fase la conforman categorías y cada categoría está compuesta por factores de diseño que toman

valores que individualizan los componentes del AV. Por ejemplo, los factores seleccionados en la fase 1 determinan los valores a considerar en la fase 2, mientras que los factores de ambas etapas derivan en los resultados mostrados en la fase 3. Por último, los resultados obtenidos en la fase 3 pueden usarse para pre-configurar los factores de la fase 1. Enseguida se explican las tres fases del modelo de diseño.

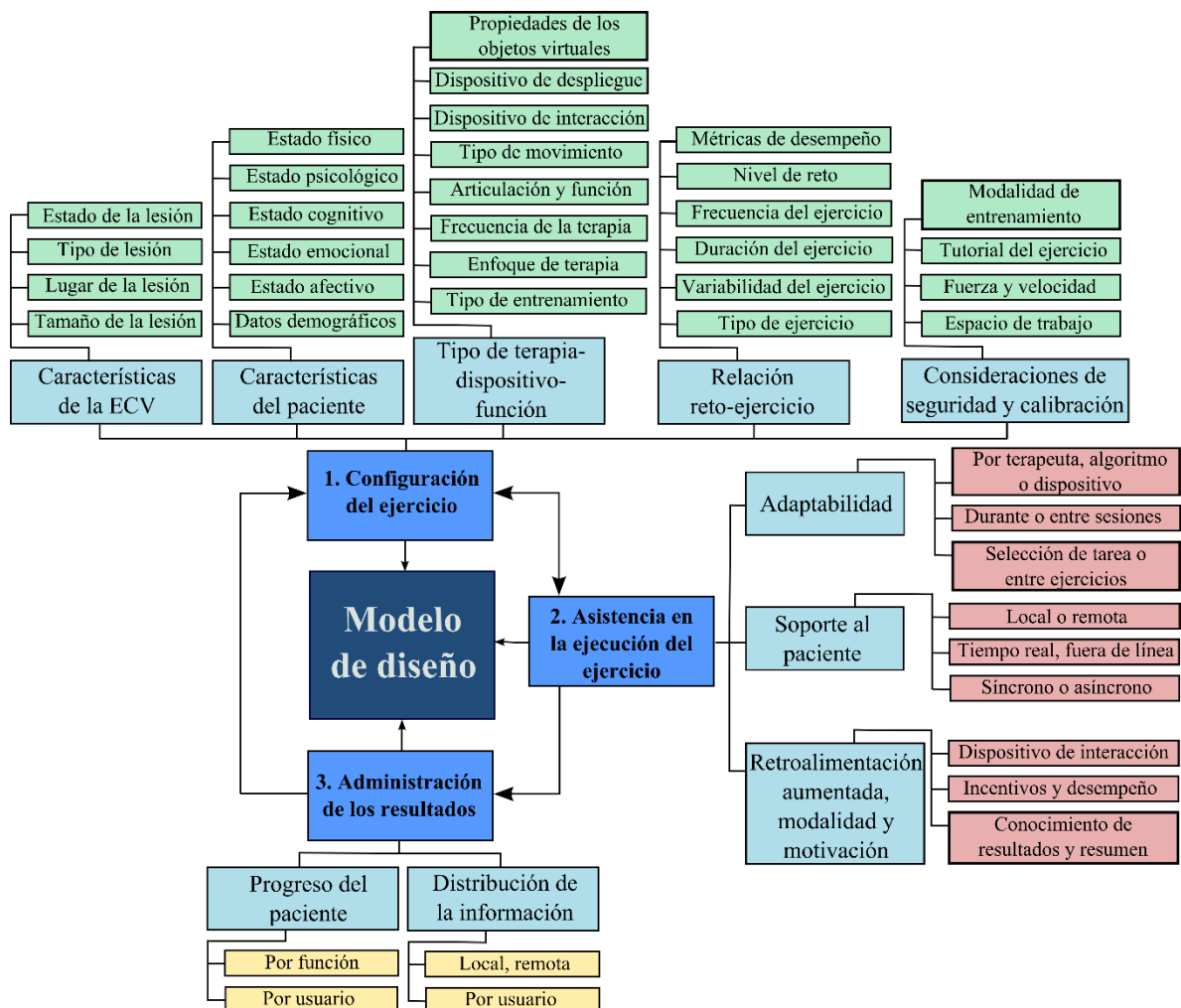


Figura 4.3. Modelo de diseño inicial para AVs de rehabilitación motriz de extremidades superiores.

4.2.1 Configuración del ejercicio

Es fundamental realizar una configuración adecuada del ejercicio para la ejecución de la terapia usando el AV. Para configurar el ejercicio, el desarrollador debe considerar que el terapeuta necesita adaptar la terapia con base en la capacidad del paciente para obtener resultados más efectivos. Enseguida se describen las categorías que conforman esta fase.

4.2.1.1 Características de la ECV

Los factores que conforman esta categoría son: lugar, tipo (p. ej. hemorrágico o isquémico), estado y tamaño de la lesión. De acuerdo con Pearson-Fuhrhop et al. [44] y Henderson et al. [10] el lugar, tipo, estado y tamaño de la lesión presentada por el paciente impacta en su proceso de rehabilitación. Como se menciona en la sección 2.1 del Capítulo 2, según la severidad de la ECV, el paciente tiene deterioros en las funciones del cuerpo y estructuras, limitaciones en las actividades personales y restricciones para participar en las actividades de la vida diaria. La parálisis unilateral (hemiplejia) es una de las afectaciones motrices principales después de la ECV, seguida por trastornos en la coordinación, balance y movimientos [43].

4.2.1.2 Características del paciente

Los factores de esta categoría son: demográficos (p. ej. género, edad, raza, etnicidad), estado cognitivo, psicológico, emocional, físico y afectivo. Las características de los pacientes son factores importantes para lograr una rehabilitación exitosa. Por lo anterior, es importante alinear correctamente las habilidades físicas y afectaciones afectivas, emocionales, cognitivas, psicológicas de los pacientes, con las tareas terapéuticas. De esta manera, es posible mejorar sus capacidades residuales evitando fatiga y frustración [70]. Esta alineación depende de la parte afectada (p. ej. hombro, codo, muñeca o dedos) y el tipo de movimiento (simple o compuesto). Además, según la lesión del paciente su movilidad puede ser nula (hemiplejia) o con disminución de fuerza (hemiparesia) [97]. Por ejemplo, Burke et al. [25] presenta un AV en donde se configuran parámetros como el brazo lesionado (izquierdo o derecho), la velocidad y la duración del ejercicio. Por otro lado, Jung et al. [97] asigna previo al ejercicio las características físicas del paciente, p. ej. tamaño de la mano, altura y ancho de los hombros. Mientras que Saini et al. [26] define como parámetros iniciales el tamaño de la mano, la dirección del movimiento y el tiempo de duración del ejercicio, entre otros.

4.2.1.3 Tipo de terapia-dispositivo-función

Los factores de esta categoría son: tipo de entrenamiento, enfoque de terapia y frecuencia, dispositivo de interacción, función y articulación, tipo de movimiento, dispositivo de despliegue visual y propiedades de los objetos virtuales. Primeramente se debe determinar

el tipo de entrenamiento a aplicar para configurar el AV, que puede ser unilateral (usando una mano) o bilateral (usando las dos manos). Con base en el tipo de entrenamiento, se define el enfoque de terapia a usar basada en tareas, en la restricción de movimiento, en la terapia de espejo, en objetivos, entre otros [6]. Dependiendo de ello, el programador requiere considerar el uso de uno o más dispositivos al mismo tiempo para la interacción del paciente con el AV. La selección del dispositivo de interacción –robótico o no robótico- se relaciona con la función a fortalecer en el paciente y la articulación correspondiente. Siendo la fuerza muscular, el rango de movimiento o la coordinación vista-mano (precisión) algunas de las funciones a recuperar en los pacientes [3], con movimientos como la flexión-extensión, aducción-abducción, pronación-supinación, entre otros. Así, por ejemplo con un dispositivo de interacción robótico, el desarrollador puede usar un modo de entrenamiento -activo, activo-asistido, pasivo, resistivo, entre otros- para la ejecución del movimiento [71], [99], [131]–[138]. Por ejemplo, en Boulanger et al. [22] se propone una terapia unilateral basada en tareas usando una interfaz táctil para mejorar el rango de movimiento de la muñeca de los pacientes.

Además, en el AV se utilizan dispositivos de despliegue con un enfoque inmersivo (usando p. ej. pantallas montadas en la cabeza o lentes) o no inmersivo (usando p. ej. monitores, celulares o proyectores). Adicionalmente, es necesario determinar si los objetos virtuales del AV se podrán deformar al interactuar con ellos y el tipo de acciones a realizar con los mismos, p. ej. presionar, tirar, agarrar, deformar [139]. Por ejemplo, en Loconsole et al. [140] se resalta la influencia del tipo de objetos y sus características -real, virtual, deformable- en el resultado del ejercicio y la motivación del participante.

4.2.1.4 Relación reto-ejercicio

Los factores de esta categoría son: tipo -lúdico o formal-, variabilidad, duración y frecuencia del ejercicio, nivel de reto y métricas de desempeño. En un AV se pueden ejecutar ejercicios lúdicos o formales que varían dependiendo de la parte del brazo afectado y el nivel de complejidad del movimiento. Además, el tipo de ejercicio puede ser una réplica de actividades de la vida diaria –por ejemplo cocinar- o actividades de juego en donde se divierta al paciente [141], [142]. La duración, frecuencia y nivel de reto del ejercicio impactan en la adherencia y entretenimiento del participante [97], [143]. Por último, es posible definir el nivel de reto antes, durante o después de la terapia según las

métricas de desempeño obtenidas por el paciente. Por ejemplo, en Annema et al. [98], Burke et al. [25] y Sucar et al. [8] se utilizan AVs con varios juegos en donde su nivel de reto puede ajustarse de forma flexible en cualquier momento.

4.2.1.5 Calibración de la interfaz y entrenamiento

Espacio de trabajo, fuerza, velocidad, modalidad de entrenamiento y tutorial del ejercicio son los factores de esta categoría. Una interfaz o dispositivo es utilizado para interactuar con el AV. En la literatura existen una gran variedad de dispositivos que proporcionan funcionalidad para fortalecer el rango de movimiento, la fuerza, la precisión de los pacientes, entre otros [71], [99]. La calibración del dispositivo depende de la capacidad, el rango, el tipo de movimiento, la morfología y la fuerza máxima del paciente. Es importante que el paciente realice un entrenamiento para determinar los valores adecuados para calibrar el dispositivo de interacción. Este entrenamiento es un paso previo a la ejecución de la terapia y es determinante para realizar de manera guiada, asistida o restringida el ejercicio [100]. Por ejemplo, en Burke et al. [25] se determina la calibración del dispositivo con archivos preestablecidos de configuración o con nuevos valores calculados durante la ejecución del ejercicio, además se propone un tutorial del ejercicio en apoyo al entrenamiento. Una vez determinada la calibración del dispositivo, se ejecutan movimientos para familiarizar al paciente con el ejercicio. Además, en Holden y Dyar [144] se propone el principio de aprendizaje por imitación para realizar el entrenamiento del ejercicio, mientras que en Baran et al. [145] se asiste el ejercicio según la modalidad de entrenamiento del dispositivo de interacción.

4.2.2 Asistencia en la ejecución del ejercicio

Esta fase agrupa categorías y factores de diseño que dan soporte al terapeuta y al paciente cuando ejecuta su terapia. A continuación se describen las categorías de esta fase.

4.2.2.1 Adaptabilidad

Los factores de esta categoría son: por el terapeuta, algoritmo o dispositivo de interacción, durante o entre sesiones, selección de tarea o entre ejercicios. Es importante adaptar de forma gradual el nivel de dificultad en el ejercicio durante la sesión, entre sesiones, al seleccionar la tarea o entre los ejercicios. La graduación se realiza de forma automática durante la ejecución del ejercicio por medio del terapeuta, un algoritmo de decisión o el

dispositivo de interacción [24], [98], [100]. Las características de los objetos -peso, tamaño, posición, cantidad, entre otros- se individualizan para garantizar un nivel adecuado de retroalimentación de fuerza, duración del ejercicio, y rango de movimiento, entre otros. La individualización de los parámetros anteriores, ayuda a evitar que el ejercicio se vuelva aburrido o que tenga un nivel de reto inadecuado [6]. Por ejemplo, en Alankus et al. [100] se gradúa el rango de movimiento del ejercicio según la compensación detectada en el paciente. Por su parte, en Sucar et al. [8] se utiliza un algoritmo para adaptar el nivel de dificultad, esto es, la velocidad y la desviación de las trayectorias de movimiento. Finalmente, en Mali et al. [146] se sugiere facilitar la etapa de configuración del ejercicio al tomar en cuenta los resultados de sesiones previas y adaptar los parámetros del dispositivo de interacción. Así, la sesión de terapia continúa con los datos almacenados de los pacientes para definir el nivel de reto en el ejercicio según el último tamaño del espacio de trabajo, entre otros.

4.2.2.2 Soporte local o remoto del paciente

El soporte local o remoto, en tiempo real (al ejecutar el ejercicio) o fuera de línea (antes o después de ejecutar el ejercicio), y la comunicación de forma síncrona o asíncrona son los factores de esta categoría. El lugar de uso del AV regularmente es el hogar del paciente o un centro de rehabilitación que depende del estado de la ECV -aguda, subaguda, crónica- y el programa de terapia. De aquí que, si el paciente se encuentra en su hogar, es importante darle soporte vía remota en tiempo real o fuera de línea [147], [148]. Además, es importante tener comunicación con los pacientes aunque no sea en tiempo real (asíncrona) usando p. ej. un mensaje de correo electrónico o estadísticas de progreso, o en tiempo real (síncrona) usando p. ej. un mensajero instantáneo, una videollamada o una videoconferencia. Por ejemplo, en Annema et al. [98] se establece la necesidad de pausar la ejecución de la terapia para proporcionar instrucciones extra o indicar al paciente el movimiento adecuado para garantizar la calidad del ejercicio.

4.2.2.3 Retroalimentación aumentada, modalidad y motivación

La retroalimentación aumentada mediante el dispositivo de interacción, visualización del desempeño e incentivos, y conocimiento de resultados o resumen son los factores clave de esta categoría que impactan en la motivación, la adherencia y el entretenimiento de los pacientes. La retroalimentación aumentada incrementa el aprendizaje el cual es posible

expresar mediante barras de desempeño o cambios de forma del avatar que representa al paciente. Para retroalimentar al paciente, es esencial informarle su desempeño en tiempo real y también almacenar las métricas de desempeño para su análisis posterior [97]. La modalidad de retroalimentación -visual, auditiva o háptica- estimula diferentes canales sensoriales que mejoran la presencia del paciente en el AV, al mismo tiempo incrementa su adherencia [25], [149]. La selección de la modalidad de retroalimentación depende del nivel cognitivo y físico del paciente y las características propias del dispositivo de interacción [6]. Además, los incentivos incrementan la motivación, el entretenimiento y la adherencia en el ejercicio, los cuales es posible representar por medio de íconos, vibraciones, fuerzas, y sonidos, entre otros [100]. Por ejemplo, en Holden y Dyar [144] se establece que la retroalimentación extrínseca o aumentada puede representarse concurrentemente con el desempeño directamente después de un entrenamiento (conocimiento de resultados) o como resumen después de varios entrenamientos (retroalimentación resumida). Ines y Abdelkader [78] proporciona mensajes gratificantes como incentivos, mientras que en Boulanger et al. [22] se usan gestos metafóricos de la mano del paciente.

4.2.3 Administración de los resultados

Deben interpretarse los resultados actuales e históricos o resumidos del desempeño del paciente para la toma de decisiones al terminar la ejecución de la terapia. Enseguida se presentan los factores de esta fase, los cuales están organizados en las categorías de progreso del paciente y distribución de la información.

4.2.3.1 Progreso del paciente

Según la función a recuperar y el tipo de usuario del AV (p. ej. paciente, terapeuta, médico especialista en rehabilitación) a quien se le muestra el progreso son los factores de esta categoría. El progreso del paciente necesita mostrarse de forma clara y sencilla de interpretar por los terapeutas, pacientes y médicos especialistas en rehabilitación para evitar confusiones en la interpretación de resultados [98]. Para lograrlo, es posible almacenar y generar gráficas o tablas que faciliten su entendimiento. Por ejemplo, en Annema et al. [98] y Timmermans et al. [6] se propone describir al terapeuta el progreso del paciente según la función (p. ej. rango de movimiento, fuerza). Otro ejemplo, en Flores et al. [24] se sugiere

mostrar al paciente una gráfica de barras con el porcentaje de tareas alcanzadas de forma exitosa en las últimas sesiones.

4.2.3.2 Distribución de la información

Los factores de esta categoría son el tipo de accesibilidad -local o remota- y el usuario que tendrá acceso a los resultados. Se debe compartir la información con el equipo -psicólogos, médicos especialistas en rehabilitación, terapeutas físicos, entre otros- que toma las decisiones para el seguimiento del programa de terapia. Es posible compartir de forma local o remota la información dependiendo de la ubicación de los especialistas. Por ejemplo, en Ines y Abdelkader [78] se propone monitorear remotamente el progreso y modificar en línea el programa de terapia del paciente que usa el AV desde su casa.

Una vez explicadas las fases, las categorías y los factores del modelo de diseño propuesto, enseguida se explica la metodología utilizada en la validación inicial propuesta.

4.3 Validación del modelo de diseño

4.3.1 Metodología

La validación inicial del modelo se realizó en dos procedimientos basados en la revisión de la literatura. En el primer procedimiento se compararon los factores del modelo de diseño propuesto con los principios de aprendizaje motriz establecidos por diversos autores (ver Tabla 4.1) y los principios de neuroplasticidad establecidos en Kleim y Jones [53] (Tabla 4.2). La plasticidad neuronal se caracteriza como la capacidad adaptativa del sistema nervioso central [53].

Tabla 4.1. Principios de aprendizaje motriz.

Referencia (s)	Principio
[34]	La rehabilitación debe iniciar lo más rápido posible después de una ECV
[8], [34], [150], [151]	Entrenamiento basado en tareas
[3], [34], [80], [144], [150]– [152]	Motivación y adherencia del paciente y su familia
[3], [34]	Entornos o escenarios enriquecidos
[3], [144]	Retroalimentación acorde a las capacidades del paciente
[153], [154]	Movimiento activo, repetitivo e intenso
[34]	Establecer metas específicas, medibles y dependientes del tiempo que guían la terapia

[3], [152]	Variar los ejercicios de entrenamiento en las diferentes sesiones
------------	---

Tabla 4.2. Principios de plasticidad dependientes de la experiencia (tomada de Kleim y Jones [53]).

Principio	Descripción
Usarlo o perderlo	No conducir funciones específicas del cerebro puede conducir a la degradación funcional
Usarlo y mejorarlo	El entrenamiento que impulse una función específica del cerebro puede conducir a una mejora de esa función
Especificidad	La naturaleza de la experiencia de entrenamiento dicta la naturaleza de la plasticidad
La repetición importa	La inducción de la plasticidad requiere suficiente repetición
La intensidad importa	La inducción de la plasticidad requiere suficiente intensidad de entrenamiento
El tiempo importa	Diferentes formas de plasticidad ocurren en diferentes momentos durante el entrenamiento
La prominencia importa	La experiencia del entrenamiento debe ser lo suficientemente relevante para inducir la plasticidad
La edad importa	La plasticidad inducida por el entrenamiento se produce más fácilmente en cerebros jóvenes
Transferencia	La plasticidad en respuesta a una experiencia de entrenamiento puede mejorar la adquisición de comportamientos similares
Interferencia	La plasticidad en respuesta a una experiencia puede interferir con la adquisición de otros comportamientos

En el segundo procedimiento se utilizaron los factores del modelo propuesto para clasificar AVs de rehabilitación motriz de extremidades superiores para pacientes con ECV. En la clasificación, se usa la metodología propuesta por Beaudouin-Lafon [129] aplicando los factores para analizar los AVs desde la perspectiva de adaptabilidad, el costo tecnológico y el alcance de la evaluación del AV. Los AVs usados para comparar los factores fueron seleccionados con tres criterios de inclusión: 1) AV para pacientes con ECV o enfermedad neurológica, 2) AV evaluado con personas sanas o pacientes, y 3) alcance de la evaluación del AV en términos de usabilidad, el desempeño o una prueba clínica. Enseguida se explican los resultados obtenidos en la validación inicial del modelo de diseño propuesto.

4.4 Resultados

4.4.1 Comparación de los factores

Fase 1: Configuración del ejercicio

En la categoría de *características de la ECV* se encontró que los factores del tamaño y lugar de la lesión también son mencionados por otros autores (por ejemplo [34], [44], [152], [155]). Además, en Huang et al. [152] se establece que el tamaño y lugar de la lesión, la motivación durante la terapia y la habilidad cognitiva del paciente tienen influencia en cualquier terapia.

En la categoría *características del paciente*, Pearson-Fuhrhop et al. [44] indica que los factores de la edad y el género -entre otras características demográficas- afectan en la recuperación motriz del paciente. Por su parte, en Kleim y Jones [53] se incluye el factor de la edad del paciente como un principio a considerar para lograr su plasticidad neuronal (ver Tabla 4.2). Por ello, los especialistas (p. ej. terapeutas, médicos) requieren considerar las necesidades únicas de cada paciente para diseñar las sesiones de aprendizaje motriz mediante los AVs que respeten sus características físicas, mentales, cognitivas, emocionales y psicológicas [155]–[157].

En la categoría *tipo de terapia-dispositivo-función*, en Levin et al. [3] se señala que cuando la terapia se basa en tareas, el entrenamiento debe enfocarse en ejercicios que alienten al sistema nervioso a encontrar sus propias soluciones a problemas de control motriz. Este entrenamiento puede estar organizado en prácticas que involucren una variedad de objetos acomodados en diferentes orientaciones. Respecto a la interacción, en Iosa et al. [158] se establece que la variación del dispositivo, usando por ejemplo los dispositivos robóticos, las interfaces cerebro-computadora y los dispositivos vestibles, permiten incrementar la intensidad, las repeticiones, la especificidad y la retroalimentación durante la rehabilitación. Además, el uso adecuado del dispositivo de interacción depende del tipo de función, el movimiento y su orden, el enfoque de terapia y el tipo de entrenamiento aplicado [5]. Es posible graduar los movimientos usando por ejemplo la Ley de Fitts, mediante la retroalimentación de las variables, tales como la velocidad del movimiento, la precisión o la suavidad, proporcionadas al paciente en forma de conocimiento de resultados (*knowledge of results*) [3]. Por ejemplo, en Huang and Krakauer [152] se señala que el uso de

dispositivos de interacción con retroalimentación biológica -*biofeedback*- proporciona a los pacientes con problemas sensoriales y motrices, la oportunidad de recuperar la capacidad de evaluar mejor las diferentes respuestas fisiológicas. Además, este tipo de dispositivos de interacción brinda la posibilidad de aprender a auto-controlar dichas respuestas. Por último, en Sveistrup et al. [11] se señala que el nivel de inmersión del dispositivo de despliegue impacta en la adherencia del paciente en la tarea.

En la categoría *relación reto-ejercicio*, el factor del tipo de ejercicio considera el diseño de escenarios que simulen situaciones como juegos, de la “vida real” o la naturaleza [159]. La elección de las tareas o ejercicios a practicar deben de tener significado para el paciente porque la adherencia cognitiva y emocional son factores clave en la recuperación motriz [3]. Además, el aprendizaje motriz es ampliamente dependiente del tipo e intensidad de la práctica -duración y frecuencia del ejercicio- así como el contexto en donde sucede la práctica [3]. El aprendizaje motriz es un cambio permanente en el comportamiento motor que resulta de la práctica [157]. La práctica es un factor clave en el aprendizaje motriz. Hay muchos factores que necesitan tenerse en cuenta al diseñar el componente práctico para el aprendizaje de las diferentes tareas (esto es, variar el ejercicio) [156]. Por ejemplo, en Kleim y Jones [53] se incluye el principio de que la repetición importa, la intensidad importa (esto es, la frecuencia del ejercicio), el tiempo importa (esto es, la duración del ejercicio), entre otros. Además, en Levin et al. [3] se establece que el aprendizaje ocurre cuando la dificultad del ejercicio o tarea es incrementada progresivamente (esto es, al considerar niveles de reto) con base en la habilidad de los pacientes; siendo algunas métricas de desempeño el rango de movimiento, la velocidad, el movimiento fraccionado, la fuerza, y el trabajo muscular, entre otros [12], [144].

Por último, en la categoría de *consideraciones de seguridad y calibración*, en Muratori et al. [157] se sugiere que además del espacio de trabajo, la graduación de fuerza, la asignación de velocidad y el entrenamiento, los factores ambientales como la luz y la gravedad, también influyen en las consideraciones de seguridad y calibración del ejercicio a ejecutar. Además, la definición de los parámetros de entrada del ejercicio depende de las escalas de salida para el nivel de afectación del paciente -estructura del cuerpo o función, actividad o participación en las actividades de la vida diaria [34].

Fase 2: asistencia en la ejecución del ejercicio

En la categoría de *adaptabilidad*, en Reinkensmeyer et al. [67] se establece que cuando el dispositivo de interacción es robótico, la individualización del espacio de trabajo, fuerza o velocidad, entre otros, depende de la selección del algoritmo de entrenamiento. Este algoritmo de entrenamiento define la modalidad de uso que puede ser pasiva, activa-restringida, control de contrapeso, resistiva, amplificación de error o bimanual [67]. Además, en Basteris et al. [132] se mencionan otras modalidades de entrenamiento, p. ej. activa, pasiva-de espejo, activa-asistida, correctiva o guía de trayectoria. Estas modalidades definen el tipo de dispositivo de asistencia a usar en la ejecución del ejercicio [133]. Por último, también es posible asignar de forma manual la adaptabilidad según las especificaciones de configuración del ejercicio definidas por el terapeuta [3], [157].

En la categoría de *soporte al paciente*, en Adamovich et al. [160] se monitorean en tiempo real las tareas ejecutadas por los pacientes y se manipula de forma remota la cámara que monitoriza los movimientos entre los pacientes y sus manos. Con este monitoreo remoto se genera un soporte síncrono para el paciente. Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos son aun pocos los AVs que proporcionan soporte remoto síncrono o asíncrono, antes, durante o después de la ejecución del ejercicio de los pacientes [161].

Por último, en la categoría de *retroalimentación aumentada, modalidad y motivación*, en Cech y Martin [156] y Muratori et al. [157] se establece que la retroalimentación es un componente crítico que guía el aprendizaje motor mediante dos tipos de retroalimentación: intrínseca y extrínseca. La retroalimentación intrínseca proviene de cualquier fuente sensorial del interior del cuerpo como p. ej. los propioceptores, o fuera del cuerpo cuando el paciente se da cuenta que el objetivo no fue tocado o se ha golpeado fuera de los límites [162]. La retroalimentación extrínseca es información adicional o información sensorial aumentada proporcionada al mover algún recurso externo (p. ej. el dispositivo de interacción) [162]. La retroalimentación extrínseca o aumentada puede ser concurrente o terminal [156], en donde la información proporcionada durante la ejecución de la tarea se conoce como retroalimentación concurrente (p. ej. desempeño o incentivos) [156]. También, la retroalimentación aumentada se proporciona al terminar la tarea motriz y ésta es llamada retroalimentación terminal [156]. Usualmente la retroalimentación terminal se categoriza de dos formas: conocimiento de resultados (*knowledge of results*) y conocimiento de desempeño (*knowledge of performance*) [3], [152], [156], [157]. Por lo

tanto, en los entornos de entrenamiento simulado (p. ej. los AVs) se tiene el potencial de permitir la manipulación de múltiples tipos de retroalimentación para maximizar el aprendizaje motor [3].

Fase 3: Administración de los resultados

En las categorías de *progreso del paciente* y *distribución de la información*, en Cech Martin [156] se establecen conceptos clave relacionados a la retroalimentación concurrente y terminal para cualquier tipo de usuario en el AV. Estos conceptos son: 1) utilizar retroalimentación específica de la tarea y las necesidades del usuario (p. ej. terapeuta, médico, paciente), 2) minimizar el uso excesivo de retroalimentación, y 3) fomentar la resolución activa de toma de decisiones para auto-evaluar el progreso en la rehabilitación en lugar de confiar sólo en la retroalimentación. De esta forma, la información generada por función y usuario específico del AV -médico, terapeuta, psicólogo, paciente- ayuda al entendimiento del progreso cuantitativo y cualitativo del paciente [157]. Finalmente, la accesibilidad y la distribución local o remota de la información dependen del contexto de uso [3].

Por último, además de la validación inicial de los factores propuestos en el modelo, enseguida se explican los factores identificados que son externos al diseño de los AVs y que afectan en la rehabilitación motor de los pacientes. En Dromerick et al. [163] se establece que el apoyo de la familia es un factor externo al diseño del AV que afecta en la rehabilitación motor de los pacientes. Además, en Pearson-Fuhrhop et al. [44] se agregan el efecto de la medicación, los factores sociales, el aprendizaje y la atención en la tarea. Adicionalmente, en Schultheis et al. [13] se sugiere que la experiencia en el uso de tecnología también afecta en el rendimiento de los pacientes al ejecutar sus ejercicios usando el AV. Por último, en Huang y Krakauer [152] se añade la atención en la tarea, mientras que en Krebs et al. [150] se establecen los factores sociales y los económicos del paciente.

Enseguida se explica el segundo procedimiento de validación inicial del modelo de diseño propuesto. En este segundo procedimiento se aplican los factores para clasificar AVs encontrados en la literatura según los tres criterios de inclusión mencionados en la sección

4.3.2. Con los AVs considerados, se aplicaron los factores para analizarlos desde la perspectiva de adaptabilidad, el costo tecnológico y el alcance de la evaluación.

4.4.2 Aplicación de los factores

En total se encontraron 50 AVs que cumplieron con los tres criterios de inclusión antes mencionados: 1) AV para pacientes con ECV o enfermedad neurológica, 2) AV evaluado con personas sanas o pacientes, y 3) alcance de la evaluación del AV en términos de usabilidad, el desempeño o una prueba clínica. Estos 50 AVs se presentan en la Tabla 4.3, los cuales fueron analizados y clasificados con base en el tipo de terapia que usan, el dispositivo de interacción, las características de los ejercicios, las consideraciones de seguridad y calibración, la adaptabilidad, las métricas de desempeño y la retroalimentación proporcionada.

Tabla 4.3. AVs utilizados para aplicar los factores de diseño del modelo.

Autor (es), Referencia (año), usuarios evaluación-tipo evaluación	Tipo de terapia	Dispositivo (s) de interacción	Características de los ejercicios	Consideraciones de seguridad y calibración	Adaptabilidad	Métricas de desempeño- Retroalimentación
Jack et al. [164] (2001), pacientes- desempeño- clínica	Unilateral orientada a tareas	CyberGlove, Rutgers Master II-ND	Limpiar ventana, cachar pelota, tocar el piano	Prueba de movimiento del paciente (rango de movimiento, velocidad, movimiento fraccionado de los dedos, fuerza)	Por el terapeuta al asignar un nivel de reto	Rango de movimiento, velocidad de los dedos-visual, auditiva y háptica
Bardorfer et al. [165] (2001), personas sanas- desempeño	Unilateral orientada a tareas	PHANTOM Premium 1.5	Laberinto de varias dimensiones y fuerza de fricción	No mencionada	No mencionada	Fuerza ejercida, trayectoria de movimiento-visual-auditiva y háptica
Popescu [139] (2001), pacientes- desempeño	Unilateral orientada a tareas	Rutgers Master II-ND	Teclear, juego de pelota	Calibración del guante	Por el terapeuta: nivel de dificultad, duración	Tiempo de terminación, fuerza ejercida-visual y háptica
Holden and Dyar [144] (2002), pacientes- clínica	Unilateral orientada a tareas	CyberGlove	Juego de pelota	No mencionada	Por el terapeuta: velocidad, trayectoria y apariencia del ejercicio	Trayectoria de movimiento, desempeño (velocidad, errores)-visual y háptica
Reinkensmeyer et al. [166] (2002), pacientes y cuidadores- desempeño	Unilateral orientada a tareas	Joystick con retroalimentación de fuerza, mouse	Juego de escapar	Velocidad, fuerza mediante prueba manual	Por el terapeuta: programa del ejercicio y asistencia o Resistencia de movimiento	Tiempo de terminación, objetivos logrados actuales e históricos-visual, auditiva y háptica
Adamovich et al. [167] (2004), pacientes- clínica	Unilateral orientada a tareas	CyberGlove y Rutgers Master II-ND	Juego con mariposa, tocar el piano	No mencionada	No mencionada	Tiempo de terminación, tareas exitosas, velocidad de movimiento-visual, auditiva y háptica

Yeh et al. [168] (2005), pacientes-desempeño	Unilateral orientada a tareas	PHANTOM, CyberGrasp, sensores	Juego de pelota, tomar y soltar cubos. Formal al tomar objetos de la vida	Rango de movimiento, velocidad	Por el terapeuta: nivel de reto, tamaño y configuración del cubo, tipo de fricción de la superficie	Tiempo de terminación-visual y háptica
Luo et al. [169] (2005), un paciente-desempeño	Unilateral orientada a tareas	Joystick con retroalimentación de fuerza	Formal al mover diversos objetos de la vida diaria	No mencionada	Por el terapeuta: posición, tamaño y orientación de los objetos	Tiempo de terminación, objetos logrados-visual y háptica
Srimathveeravalli y Thenkurussi [170] (2005), personas sanas-desempeño	Unilateral, orientada a metas	PHANTOM Desktop	Formal mediante escritura	No mencionada	Por el dispositivo de interacción: resistencia o asistencia de fuerza	Tiempo de terminación, fuerza aplicada, caracteres presionados correctamente-visual y háptica
Jung et al. [97] (2006), personas sanas-usabilidad	Unilateral orientada a tareas	Guante	De juego tomando cubos	Ancho de los ojos, tamaño del brazo y mano	No mencionado	Tiempo de terminación-visual
Mali et al. [146] (2006), pacientes y terapeutas-desempeño y clínica	Unilateral orientada a tareas	HIFE	Juego con pelota y botones	Fuerza máxima, rango de movimiento y flexión del dedo	Por el terapeuta: diversos niveles de dificultad	Fuerza aplicada, tiempo de terminación-visual y háptica
Kuttuva et al. [143] (2006), pacientes-clínica	Unilateral orientada a tareas	Sistema de mano Rutgers	Juego de tomar y colocar un balón	Rango de aducción-flexión-extensión del hombre	Por el terapeuta: niveles de dificultad	Tareas correctas, tiempo de terminación, velocidad, tamaño del balón-visual y háptica
Piron et al. [148] (2006), pacientes-clínica	Unilateral orientada a tareas	Objeto real con sensores	Actividad formal de mover un objeto por diversas trayectorias	No mencionada	No mencionada	Velocidad de movimiento, tiempo de terminación-visual
Shakra et al. [171] (2006), personas sanas-desempeño	Unilateral orientada a tareas	Sistema CyberGrasp	Juego de mover cubos, actividad formal de tomar té	No mencionada	No mencionada	Tiempo de terminación, fuerza ejercida-visual y háptica
Kayyali et al. [172] (2007), terapeutas ocupacionales-usabilidad	Unilateral orientada a tareas	CyberForce	Juego de mover una taza y usar un laberinto	Control de la velocidad, ángulo y tiempo de retardo	Por el terapeuta: niveles de reto	Tiempo de terminación-visual y háptica
Guo et al. [173] (2007), personas sanas-desempeño	Unilateral and bilateral orientada a tareas	PHANTOM Omni	Juego con cubos	Velocidad, posición y orientación de los objetos	Por el dispositivo: asistencia; y el terapeuta: propiedades de los objetos	Tiempo de terminación-visual y háptica
Stewart et al. [174] (2007), pacientes-desempeño y clínica	Unilateral orientada a tareas	PHANTOM Premium 1.5	Juego de tomar y colocar un objeto	Largo del brazo, de movimiento	No mencionada	Tiempo de terminación-visual y háptica
Guo and Song [175] (2007), personas sanas-desempeño	Unilateral orientada a tareas	PHANTOM Omni	Juego de laberinto	No mencionada	Por el dispositivo: asistencia	Tiempo de terminación, velocidad, trayectoria de movimiento-visual y háptica
Yang and Kim [176] (2008), personas sanas-desempeño	Unilateral, orientada a metas	PHANTOM Premium 1.0	Juego de pintar, actividad formal de escritura y marcar un número usando un teléfono	Velocidad, fuerza a ejercer	Por el terapeuta: diferentes niveles de velocidad y tamaños de los objetos,	Velocidad, precisión-visual, auditiva y háptica

					asistencia del dispositivo	
Adamovich et al. [177] (2008), pacientes-clínica	Unilateral y bilateral orientada a tareas	CyberGlove, CyberGrasp, Haptic MASTER	Juego de tocar el piano, mover pelotas. Actividad formal de colocar tazas, usar martillo	Espacio de trabajo para asignar el rango de movimiento	Por el terapeuta: niveles de dificultad. Por el dispositivo efectos de gravedad o anti gravedad	Número de golpes correctos, tiempo de terminación, trayectoria, suavidad de movimiento, precisión, fuerza ejercida-visual y háptica
Alamri et al. [178] (2008), personas sanas-desempeño	Unilateral orientado a tareas	Sistema CyberGrasp	Juego de bloques, navegar por laberinto, softball, actividad formal de tomar una taza	Ancho y geometría de los objetos, fuerza de respuesta	Por el terapeuta: dureza de la bola, asistencia del dispositivo	Velocidad, trayectoria, tiempo de terminación-visual y háptica
Takahashi et al. [154] (2008), pacientes-clínica	Unilateral orientada a tareas	HWARD	Juego de partido de la joya	No mencionada	No mencionada	Fuerza ejercida, velocidad, precisión, tiempo de terminación-visual y háptica
Broeren et al. [179] (2009), personas sanas y pacientes-clínica	Unilateral orientada a tareas	PHANTOM Omni	Juego con pescados, tenis, bingo, simón dice, entre otros	No mencionada	No mencionada	Fuerza ejercida, tiempo de terminación, trayectoria, velocidad-visual y háptica
Adamovich et al. [180] (2009), pacientes-desempeño y clínicas	Bilateral orientada a tareas	Dos sistemas Cybergrasp y Cyberglove	Juego de tocar el piano	Ángulos de flexión y extensión de cada dedo	Por algoritmo y dispositivo: asistencia en el movimiento	Rango de movimiento, velocidad, precisión-visual, auditiva y háptica
Merians et al. [181] (2009), pacientes-desempeño y clínicas	Unilateral y bilateral orientada a tareas	Haptic Master y sistema Cyberglove	Juego de mover mano en plasma, golpear con martillo, tocar el piano	No mencionada	Por el dispositivo: asistencia en el movimiento	Duración, suavidad, trayectoria y fraccionado de movimiento, tareas correctas-visual y háptica
Sucar et al. [182] (2009), pacientes-usabilidad y clínica	Unilateral orientada a tareas	Joystick	Juego de básquet y carros. Actividad formal de pintar, cocinar e ir al mercado	Rango de movimiento	No mencionada	Tiempo de terminación, tareas exitosas-visual
Sucar et al. [183] (2010), pacientes-usabilidad y clínica	Unilateral orientada a tareas	Cámara, gripper	Juego de cazar, matar moscas, limpiar ventana. Actividad formal de hacer huevos	Presión ejercida en gripper, rango de movimiento	No mencionada	Tiempo de terminación, tareas correctas-visual y auditiva
Alankus et al. [184] (2011), un paciente-desempeño	Unilateral orientada a tareas	Control de Nintendo Wii	Jugar con helicóptero, básquet, ping pong	Rango de movimiento	Por el terapeuta: velocidad, ancho y alto de objetos, lugar de las metas	Precisión, suavidad, tiempo de terminación-visual
Baran et al. [145] (2011), personas sanas-desempeño	Unilateral orientada a tareas	Sensor de movimiento	Juego de cartas	Trayectoria de movimiento	Por algoritmo después de la tarea	Trayectoria, velocidad-visual y auditiva
Friedman et al. [185] (2011), pacientes-desempeño y usabilidad	Unilateral, orientado a metas	Guante	Terapia de música	Entrenamiento del ejercicio para familiarizar	No mencionada	Número correcto de notas, tiempo promedio-visual
Kaluarachchi et	Unilateral	Nintendo Wii	Juego de	No mencionada	Por el terapeuta:	Tiempo de

al. [186] (2011), personas sanas- usabilidad	orientada a tareas		monedas y el tesoro		niveles de dificultad	terminación, tareas exitosas-visual y auditiva
Karime et al. [187] (2011), personas sanas- usabilidad	Unilateral orientada a tareas	Sensor de presión y acelerómetro	Juego de carro	No mencionada	Por algoritmo: forma en que se acomodan los carros	Velocidad, posición actual, tiempo transcurrido, tiempo total, trayectoria- visual y háptica
Loconsole et al. [140] (2012), personas sanas- desempeño	Unilateral orientada a tareas	Microsoft Kinect, PERCRO L- exoesqueleto	Actividad de la vida diaria	Espacio de trabajo	Por algoritmo: trayectoria a mostrar	Trayectoria, fuerza ejercida, tiempo de terminación-visual y háptica
Yeh et al. [188] (2012), pacientes- usabilidad	Bilateral orientada a tareas	Microsoft Kinect	Juego de mover una cesta, tomar un balón	No mencionada	No mencionada	Tareas exitosas, tiempo de terminación, tiempo de respuesta-visual
Mihelj et al. [189] (2012), pacientes- usabilidad	Unilateral orientada a metas	Robot HapticMaster	Juego de colocar una botella dentro de cestos	Rango de movimiento, trayectoria	Por algoritmo y dispositivo: asistencia, resistencia	Trayectoria, rango de movimiento-visual, auditiva y háptica
Barzilay and Wolf [141] (2013), personas sanas- desempeño	Unilateral orientada a tareas	Sistema de captura de movimiento	Juego de pelota, burbujas, dibujar	Calibración de la red según la posición y velocidad de movimiento	Por algoritmo: redes neuronales artificiales según desempeño	Tareas exitosas, tiempo de terminación-visual
Bhattacharya et al. [190] (2013), personas sanas y pacientes- desempeño	Unilateral orientada a tareas	Joystick	Juego de carro	Ejercicio de entrenamiento	Por el terapeuta: número de bloques y obstáculos	Tiempo de terminación, número de errores (colisiones)-visual y auditiva
Boulanger et al. [22] (2013), pacientes- usabilidad	Unilateral orientada a tareas	Tableta de Microsoft Surface	Juego de pescar	No mencionada	No mencionada	Tareas exitosas- visual y auditiva
Tsoupikova et al. [191], [192] (2013,2015), pacientes- clínica	Unilateral orientada a tareas	Guante pneumatic	Juego de Alicia en el país de las maravillas]	Sesión de entrenamiento para el terapeuta	No mencionada	Tiempo de terminación-visual
Turolla et al. [193] (2013), pacientes- clínica	Unilateral orientada a tareas	Sistema de captura de movimiento	Juego de mover un objeto	Rango de movimiento	Por el terapeuta: posición y orientación de los objetos	Trayectoria, tiempo de terminación-visual
Tanaka et al. [194] (2013), pacientes- desempeño y clínicas	Unilateral orientado a tareas	Sensor de movimiento	Juego de pasar objetos por un arco	No mencionada	No mencionada	Trayectoria de movimiento, tiempo de terminación-visual
Vela Nuñez et al. [195] (2013), personas sanas- desempeño y usabilidad	Unilateral orientada a tareas	Microsoft Kinect	Juego de cartas de colores	No mencionada	Por el terapeuta: niveles de dificultad	Tareas exitosas- visual y auditiva
Sucar et al. [8] (2014), pacientes- desempeño	Unilateral orientada a tareas	Sistema de sensores, gripper	Juego de voltear la carne, limpiar ventana y matar mosco	Calibración del rango del movimiento, fuerza máxima	Por algoritmo: proceso de decisión de Markov	Tareas exitosas, tiempo de terminación-visual y auditiva
Schuster-Amft et al. [46] (2014), terapeutas y pacientes- usabilidad y clínicas	Bilateral orientada a tareas	Guante	Juego de mover una pelota de un lugar a otro	No mencionada	No mencionada	Rango de movimiento, tareas exitosas
Metzger et al. [196] (2014), pacientes- desempeño y	Unilateral orientada a tareas	ReHapticKno b	Actividad formal de tomar objetos	No mencionada	No mencionada	Tiempo de terminación-visual y háptica

usabilidad						
De Gouvea et al. [197] (2015), pacientes-desempeño	Bilateral orientada a tareas	Nintendo Wii	Juegos de canoa, ritmo, brincar, esquí	No mencionada	No mencionada	Rango de movimiento, velocidad, tareas exitosas-visual
Levin et al. [198] (2015), pacientes-desempeño y clínicas	Unilateral orientada a tareas	Sistema Cybergrasp y Cyberglove	Tomar y soltar objetos con tres condiciones: agarre cilíndrico, agarre con fuerza y agarre de precisión	No mencionada	Por el dispositivo: asistencia en el movimiento	Rango de movimiento, velocidad-visual y háptica
Rahman et al. [199] (2015), personas sanas y pacientes-desempeño y clínicas	Unilateral orientada a tareas	iRest	Juego de escribir una letra, un rombo y un círculo	Tamaño de la mano, distancia máxima, mínima, lateralidad	Por el terapeuta: que brazo, largo, distancia	Distancia, agarre, estabilidad, trayectoria-visual y háptica
Ballester et al. [200] (2015), pacientes-desempeño, usabilidad y clínicas	Bilateral orientada a metas	Microsoft Kinect	Juego de mover una pelota	Rango de movimiento	Por algoritmo: dificultad de la tarea con base a la amplitud de movimiento	Trayectoria, rango de movimiento, precisión-visual
Shin et al. [201] (2015), pacientes-desempeño y clínica	Bilateral orientada a metas	Microsoft Kinect	Juego de box	Rango y ángulo de movimiento	No mencionada	Trayectoria, rango de movimiento-visual y auditiva

A continuación se explican los diferentes niveles de adaptabilidad encontrados en los AVs a los cuales les aplicamos los factores del modelo de diseño propuesto (ver Tabla 4.3). Después, se explica la clasificación de los factores del modelo de diseño según su costo tecnológico. Por último, se clasifican los factores del modelo de diseño propuesto según su contribución en la rehabilitación motriz.

En el análisis de los 50 AVs con base en la categoría de adaptabilidad se identifica que hay soluciones que consideran el nivel de reto, el tipo de ejercicio y la calibración fija para todos los pacientes, p. ej. [22], [46], [148], [154], [167], [171], [179], [188], [196]. Por otro lado, se encontraron AVs que permiten adaptar la rehabilitación para la sesión actual o entre las diferentes sesiones. Esta adaptabilidad se define en la fase de *configuración del ejercicio* y se actualiza en la fase de *asistencia en la ejecución del ejercicio* según el desempeño de los pacientes o se mantiene fija hasta que nuevamente se modifica en la fase de *configuración del ejercicio* (ver Figura 4.4). Enseguida se explican los mecanismos usados para adaptar la rehabilitación usando los AVs.

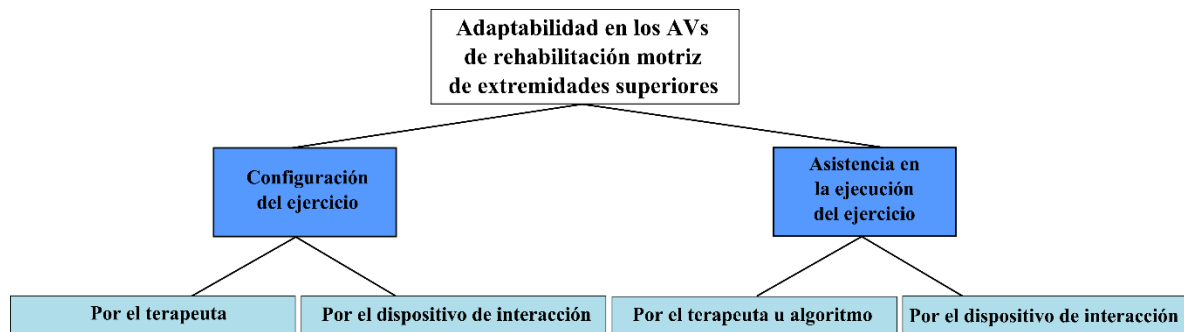


Figura 4.4. Alcance de la adaptabilidad de los AVs incluidos en la Tabla 4.3.

En primer lugar, se identificó que la adaptabilidad en la etapa de *configuración del ejercicio* usa 2 mecanismos: de forma manual por medio del terapeuta o mediante el dispositivo de interacción como resultado del entrenamiento en donde se calibra el dispositivo (ver Figura 4.4). A continuación se explican ambos mecanismos.

- De forma manual por medio del terapeuta. Previo a la ejecución del ejercicio, el terapeuta configura los factores de calibración y seguridad y/o el nivel de dificultad del ejercicio. Así, en la calibración de seguridad se propone modificar el espacio de trabajo mediante las propiedades de los objetos virtuales que se muestran en el ejercicio o las características físicas de los pacientes. Por ejemplo, se propone variar la posición, tamaño y orientación de los objetos virtuales según el rango de movimiento de los pacientes (ver [193], [202], [203]). En el nivel de dificultad del ejercicio los autores recomiendan por ejemplo, variar los diferentes niveles de trayectoria y la velocidad de movimiento de los objetos virtuales [144], [172], el peso, el ancho y la textura de los objetos virtuales [168], [190], los sonidos [195] y la duración del ejercicio [139], [143], [184]. Por otro lado, en algunos AVs se configura de forma manual tanto los diferentes niveles de dificultad como el espacio de trabajo inicial [15], [165], [179], en términos de la altura de los ojos y hombros, el tamaño del brazo, entre otros [97], [174], [182], [183].
- De forma automática por medio del dispositivo de interacción. El terapeuta configura mediante el dispositivo de interacción la calibración de seguridad y/o el nivel de dificultad del ejercicio con base en las características del paciente. Esta actividad requiere que el paciente ejecute un entrenamiento para enseñarle a utilizar el dispositivo de interacción y para familiarizarlo con el ejercicio. Por ejemplo, en Baran et al. [145]

se usa el dispositivo de interacción para determinar el rango de movimiento del ejercicio. Por su parte, en Guo et al. [173] se define la variabilidad del reto del ejercicio mediante la velocidad, el tiempo de retardo y el ángulo de movimiento.

En segundo lugar, se identificó que la adaptabilidad en la etapa de *asistencia en la configuración del ejercicio* usa dos mecanismos: de forma manual por medio del terapeuta y/o el uso de algoritmos, o de forma automática por medio del dispositivo de interacción (ver Figura 4.4). Enseguida se explican ambos mecanismos.

- De forma manual por medio del terapeuta o automática por medio de un algoritmo. Esta forma de adaptabilidad consiste en modificar las propiedades de los objetos virtuales (p. ej. velocidad, peso, trayectoria) o el nivel de dificultad para apoyar al paciente en la ejecución del ejercicio [186].
- De forma automática por medio del dispositivo de interacción. Algunos autores recomiendan inducir, asistir o restringir el movimiento del paciente a través de las modalidades de entrenamiento del dispositivo de interacción. Esta adaptabilidad es posible únicamente cuando se usan dispositivos de interacción robóticos –hápticos– según el desempeño de los pacientes [170], [175], [178].

En tercer lugar, se identificó la adaptabilidad en ambas fases: *configuración del ejercicio* y *asistencia en la ejecución del ejercicio* usando los mecanismos explicados a continuación.

- Configuración de forma manual por medio del terapeuta y en la ejecución automática por medio del dispositivo de interacción. En Reinkensmeyer et al. [166] y Adamovich et al. [177] se propone conjugar la configuración manual previo al ejercicio y la ejecución con apoyo del dispositivo de interacción usando un modo de entrenamiento -inducción, asistencia, y restricción, entre otros.
- Configuración de forma manual por medio del terapeuta y en la ejecución automática por medio de un algoritmo. En Karime et al. [187] además de realizar la configuración manual previo al ejercicio, en la ejecución se utiliza inteligencia artificial para adaptar las propiedades de los objetos virtuales.
- Configuración de forma automática por medio del dispositivo de interacción y también en la ejecución con un algoritmo. En Loconsole et al. [140] se utiliza el dispositivo de interacción para configurar el rango de movimiento, mientras que en Jack

et al. [204] y en Sucar et al. [8] se obtiene la capacidad de prensión del paciente. Con esta configuración tanto previo como en la ejecución del ejercicio, la adaptabilidad de los objetos virtuales la realizan usando algoritmos como el planeador de Jerk, y procesos de Markov, entre otros [8], [140], [164].

La adaptabilidad de los AVs identificados hasta aquí, sólo es válida para cada sesión de terapia. Por lo que, enseguida explicamos una última clasificación identificada que mantiene la adaptabilidad entre sesiones.

- Configuración de forma automática por medio del dispositivo de interacción y también en la ejecución por medio de un algoritmo. En Barzilay y Wolf [141] se configura el ejercicio por medio del dispositivo según el desempeño previo del paciente, el cual es entrenado con una red de inteligencia artificial. Con lo anterior, los datos del entrenamiento de la red permiten adaptar las propiedades de los objetos virtuales en la sesión de terapia actual y las siguientes.

Por otro lado, en la Figura 4.5 se propone un análisis de los factores del modelo de diseño según su costo tecnológico. El costo tecnológico lo definimos como el nivel de conocimiento y habilidades que debe tener el desarrollador para incluir ese factor en el AV, así como el valor económico necesario para invertir en la tecnología asociada [205]. Para incluir dicho factor en el diseño del AV es necesario analizar el costo-beneficio en la rehabilitación motriz del paciente. En este trabajo se visualiza a los factores como un conjunto de variables iniciales inherentes al paciente y su capacidad, mientras que otras variables que toman valores que se individualizan a lo largo del programa de terapia y que impactan en la rehabilitación motriz del paciente. Como se observa en la Figura 4.5, los factores relacionados a la terapia, al paciente, su ECV, la calibración de seguridad, la relación reto-ejercicio pertenecientes a la configuración del ejercicio tienen un impacto mayor en la rehabilitación. Lo anterior coincide con la evidencia mostrada en Page [206] y Roby-Brami [207]. Sin embargo, los relacionados a la asistencia de la ejecución de la terapia y la administración de resultados impactan también en la rehabilitación pero su costo de implementación es mayor (tiempo, bibliotecas, recursos). Además, en la Figura 4.5 se muestran los factores propios de la ECV y el paciente (p. ej. raza, género, edad, tipo de lesión, tamaño de lesión), no producen un esfuerzo tecnológico en términos del diseño del

AV pero sí impactan en la capacidad de recuperación del paciente. Por último, con base en los resultados de la clasificación de AVs de la Tabla 4.3, se identificó que los factores de adaptabilidad entre las sesiones mediante algoritmos o el dispositivo de interacción son factores no muy recurrentes, por ello se sugiere que tienen un costo tecnológico alto e impactan en el proceso de rehabilitación (ver Figura 4.5).

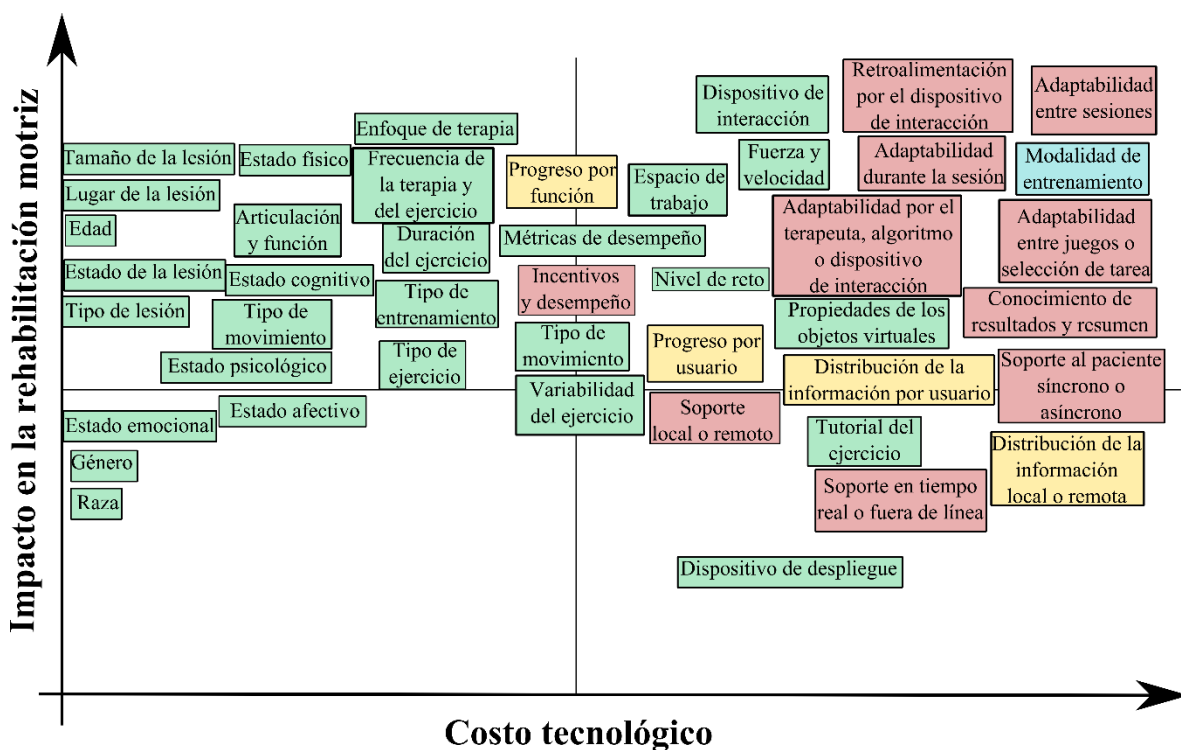


Figura 4.5. Vista de los factores del modelo desde la perspectiva de su costo tecnológico y su impacto en la rehabilitación motriz de los pacientes.

Por último, en la Figura 4.6 se propone una clasificación de los factores del modelo según su contribución en la rehabilitación motriz mediante tres dimensiones: 1) la experiencia de uso al interactuar con el AV (útil, fácil de usar, y entretenido, entre otros), 2) el desempeño y 3) la transferencia del entorno virtual al real, validada por escalas o instrumentos clínicos con impacto a nivel funcional, actividad y participación de los pacientes.

En el núcleo de la Figura 4.6 se muestran los factores relacionados con las características de los pacientes y su ECV. Estos factores son considerados como punto de partida en el proceso de recuperación del paciente usando como apoyo el AV y algunos pueden cambiar dependiendo de los resultados generados en las siguientes dimensiones [48].

Después, se encuentran los factores dinámicos que impactan en el alcance de la rehabilitación motriz los cuales influyen en las tres dimensiones. En la primera dimensión se encuentra el diseño de la interacción que permite generar la experiencia de uso del AV. En la segunda dimensión se encuentran los factores de aprendizaje motriz en el AV con base en el desempeño de los pacientes. Por último, en la tercera dimensión se encuentra la transferencia del aprendizaje virtual hacia el real que se obtiene mediante la validación de escalas o instrumentos clínicos (p. ej. [106], [142], [208]–[213]). La ausencia de factores en esta última dimensión se debe a que su resultado es una consecuencia de las dimensiones previas cuando el paciente logra cambios a nivel estructura, función, actividad y participación, validados con las escalas e instrumentos clínicos. La transferencia del aprendizaje desde el entorno virtual al entorno real depende también de los factores externos al diseño del AV.

Por último, en la Figura 4.6 se presentan los factores externos al diseño del AV encontrados en la comparación de los factores de la sección 4.2 [13], [44], [150], [163], [214], sin embargo es necesario agregar los factores del entorno mencionados en el I. En Guilmette y Kennedy [29] se resalta que la rehabilitación es un proceso de aprendizaje donde es necesario crear caminos concretos para diseñar intervenciones que ayuden a los pacientes a entender, aprender y retener su progreso. Además, en Gresham [215] se enfatiza que el tiempo adecuado para el tratamiento “es un aspecto metodológico urgente que los investigadores en rehabilitación deben resolver”. Por su parte en Hoffmann et al. [216] se sugiere la inexistencia de protocolos estándares que permitan determinar la intensidad y duración del tratamiento que generen efectos generales positivos en los ejercicios de terapia de rehabilitación motriz de los pacientes con o sin el uso de AVs.

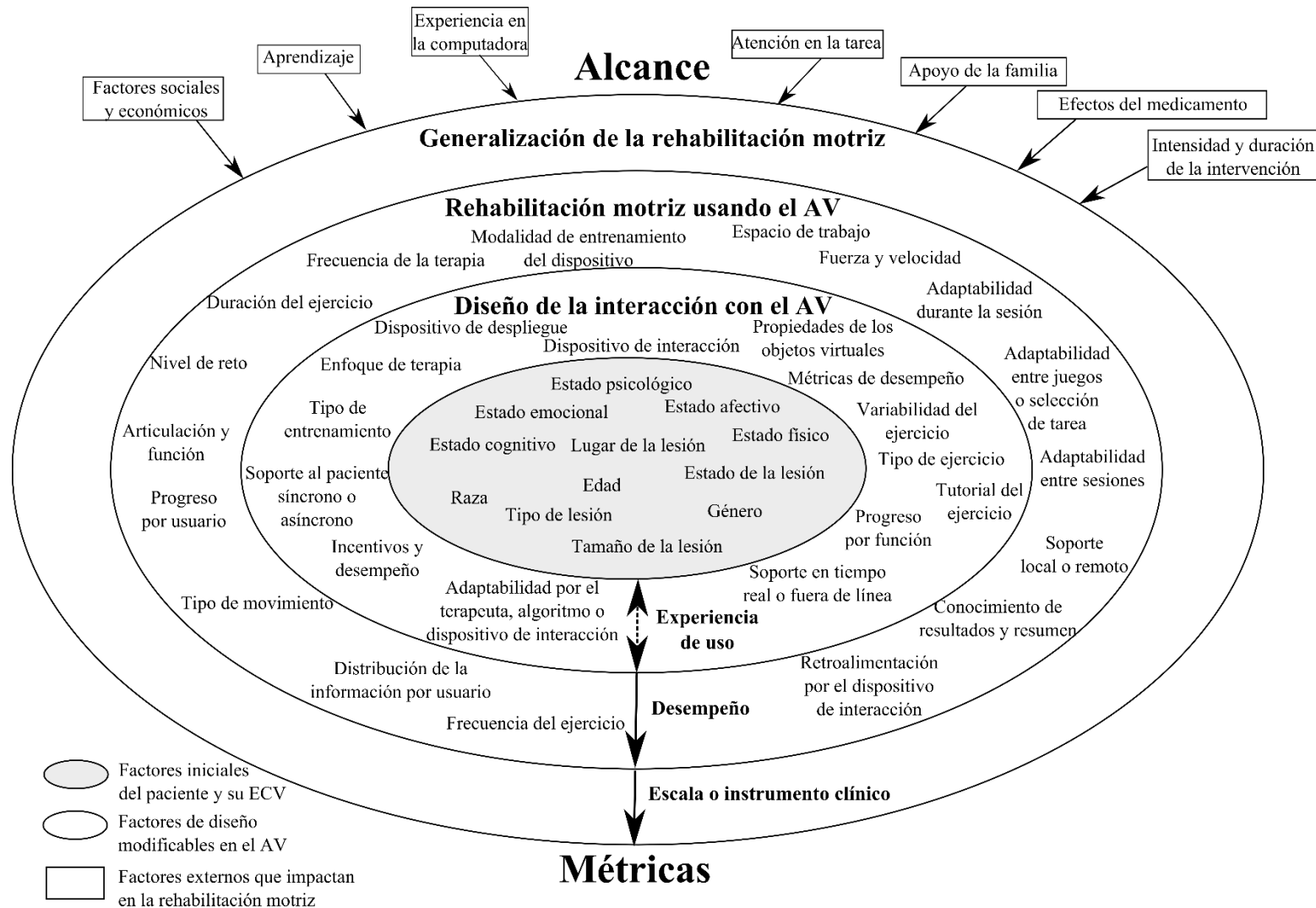


Figura 4.6. Vista de los factores del modelo según su impacto en el diseño de interacción, rehabilitación motriz y generalización del aprendizaje

4.5 Discusión

El objetivo de este capítulo fue presentar un modelo con un conjunto de factores para el diseño de AVs de rehabilitación motriz de extremidades superiores. Su definición se basó en los resultados de una revisión de la literatura de las recomendaciones de diseño para AVs de rehabilitación motriz superior de pacientes con accidente cerebrovascular. Este modelo también consideró la taxonomía inicial presentada en la sección 2.8 del Capítulo 2 y los hallazgos de la sección 3.5 del Capítulo 3. Estas recomendaciones se organizaron por medio de teoría fundamentada, en donde mediante codificación axial se definieron tres fases con base en la terapia motriz tradicional: *configuración del ejercicio*, *asistencia en la ejecución del ejercicio* y *administración de los resultados*. Para cada fase se definieron sus categorías y para cada categoría un conjunto de factores.

La validación inicial del modelo propuesto se realizó usando dos procedimientos: 1) comparación de los factores y 2) aplicación de los factores para clasificar AVs con base en sus factores de diseño. Los resultados del primer procedimiento sugieren la importancia de los factores debido a las similitudes encontradas con los principios de aprendizaje motriz identificados y los principios de plasticidad neuronal propuestos por Kleim y Jones [53]. Esta comparación se realizó en cada una de las fases del modelo explicando a detalle las coincidencias de los factores del modelo propuesto, respecto a los sugeridos por otros autores del área de aprendizaje motriz. Por último, en la comparativa de los factores se identificaron algunos factores externos que no son parte del diseño del AV pero que influyen en la rehabilitación motriz del paciente.

Por otro lado, los resultados del segundo procedimiento de validación inicial de modelo, permitió identificar diferentes mecanismos para definir el nivel de adaptabilidad de los AVs. Los mecanismos identificados fueron la adaptación por medio del terapeuta o médico o por medio del dispositivo de interacción u algoritmo; donde la capacidad de adaptación de los AVs involucra la definición de los factores de diseño de las categorías relación de ejercicio-reto, consideraciones de seguridad y calibración.

Además, el alcance encontrado para la adaptabilidad de los AVs abarca la sesión actual o entre las diferentes sesiones. En el análisis de los 50 AVs (desarrollados desde 1991 a la fecha) se identificó un resultado de 18% de los AVs con parámetros de configuración del ejercicio fijos y 82% de los AVs con adaptabilidad según los factores de diseño usados. De

los 41 AVs con adaptabilidad, sólo la propuesta de Barzilay y Wolf [141] mantiene la adaptabilidad del nivel de dificultad de sus ejercicios o espacio de trabajo entre sesiones, el resto únicamente durante la sesión actual. En los 40 VEs con adaptabilidad durante la sesión actual, 69% lo hacen sólo durante la etapa de configuración, 12% sólo durante la etapa de ejecución y 19% en ambas etapas.

Como consecuencia de la aplicación de los factores del modelo se identificaron dos oportunidades para los AVs. La primera oportunidad consiste en adaptar los AVs durante la sesión con mecanismos automáticos (p. ej. el dispositivo de interacción o algoritmos) para disminuir la carga de trabajo del terapeuta y garantizar la seguridad y el enganche del paciente. Para ello, el desarrollador del AV requiere un alto conocimiento de algoritmos (p. ej. inteligencia artificial, redes neuronales) y el acceso a dispositivos de interacción de menor costo y funcionalidad que garanticen la seguridad del paciente. Pietrzak et al. [217] sugiere como una posible solución para los AVs, que utilicen dispositivos de interacción comerciales para incrementar el acceso a la terapia en pacientes con restricciones financieras y geográficas. La segunda oportunidad consiste en mantener la adaptabilidad de la terapia entre sesiones, por lo que se sugiere mantener un ciclo entre los factores de diseño de la etapa de administración de resultados y modificar automáticamente los factores de las etapas de configuración y asistencia en la ejecución del ejercicio.

Por último, se compararon los factores desde la perspectiva de su costo tecnológico y el alcance en la rehabilitación motriz al aplicar los factores del modelo. En la perspectiva de su costo tecnológico, los factores que tienen mayor impacto en la rehabilitación motriz pertenecen a las categorías de relación reto-ejercicio, consideraciones de seguridad y calibración, adaptabilidad, y retroalimentación aumentada, modalidad y motivación. Lo anterior se ve reflejado en los hallazgos del nivel de adaptabilidad encontrados en los 50 AVs de la Tabla 4.3. Lo que sugiere que la adaptabilidad del AV -manual o automática- depende en mucho de las habilidades de los desarrolladores y la disponibilidad de recursos tecnológicos (bibliotecas, lenguajes, dispositivos de interacción, entre otros). Además, se encontraron tres niveles en la organización de los factores según el alcance en la rehabilitación motriz: diseño de interacción, desempeño en el entorno virtual y generalización del aprendizaje motriz.

Como se mencionó anteriormente, la plasticidad neuronal ocurre más rápidamente en cerebros más jóvenes y el género del paciente es importante para su recuperación motriz [52], [53]. Kleim y Jones [53] describe que la especificidad es “la naturaleza de la experiencia de entrenamiento dicta la naturaleza de la plasticidad” (ver la Tabla 4.2). Respecto a la rehabilitación usando entornos virtuales, Orihuela-Espina et al. [142] sugiere que la naturaleza del entrenamiento basado en realidad virtual tiene una correlación positiva con la mejora de la funcionalidad medida con la prueba clínica Fugl-Meyer [210] (transferencia) y la reorganización neuronal de los pacientes (neuroplasticidad). Por último, en Page [207] y Robertson y Roby-Brami [206] se señala que un entrenamiento orientado a terapia (*task-specificity*) muestra un mayor impacto positivo respecto a la intensidad de la tarea.

Por último, el modelo de diseño propuesto busca disminuir las afectaciones que tienen los pacientes a nivel función y estructura, actividad y participación en la sociedad (según la clasificación de las afectaciones del ictus de la OMS) [42]. La representación de los factores en la Figura 4.6 se asemeja al modelo propuesto por Kizony et al. [218] en donde los factores del modelo buscan lograr una transferencia de la mejora motriz (actividades) desde el entorno virtual al entorno real. Sin embargo, con base en la clasificación de la OMS los factores del modelo de diseño y los factores externos al modelo son factores de entorno que pueden ser una barrera o un facilitador en la transferencia de la ganancia obtenida en las actividades realizadas en el entorno virtual y su transferencia, y el incremento de la participación del paciente en el mundo real [42].

Finalmente, el alcance que se busca en el modelo de diseño descrito en este Capítulo consiste en dar un conjunto de factores a los desarrolladores de software que pueden ser considerados para el diseño de los AVs. La combinación de factores a usar dependerá del conocimiento de bibliotecas por parte de los desarrolladores, la disponibilidad de recursos y las consideraciones finales de los especialistas en rehabilitación.

4.6 Resumen del capítulo

En este capítulo se ha proporcionado una definición inicial del modelo de diseño para AVs de rehabilitación motriz de extremidades superiores, el cual surgió de una iteración de la taxonomía presentada en el Capítulo 2, los hallazgos descritos en el Capítulo 3 y la revisión

de la literatura de las recomendaciones de diseño explicadas en el presente capítulo. Los principales resultados de este capítulo incluyen:

- Las diferentes dimensiones de diseño encontradas en las recomendaciones.
- La definición de un modelo de diseño basado en tres fases de la terapia motriz ocupacional tradicional.
- La descripción de las categorías y factores que componen las tres fases del modelo.
- La validación inicial del modelo con base a dos procedimientos: comparación de factores con los principios de aprendizaje motriz y aplicación de los factores.
- La descripción de los factores del modelo que resaltan los autores en el área de aprendizaje motriz.
- La identificación de factores externos al diseño de los AVs que afectan en la recuperación motriz de los pacientes.
- La aplicación de los factores del modelo para clasificar los 50 AVs desde la perspectiva de adaptabilidad, costo tecnológico y alcance de la evaluación de los AVs.

En el siguiente capítulo se presenta una prueba del concepto del modelo de diseño inicial con base en el desarrollo de un AV evaluado con adultos mayores sanos y adultos mayores afectados en su capacidad motriz de mano. La evaluación ayuda a determinar el efecto de la retroalimentación háptica al ejecutar el ejercicio de rehabilitación en términos de su usabilidad, desempeño, carga de trabajo y emociones de los participantes.

Capítulo 5

Prueba de concepto del modelo de diseño

El presente capítulo presenta una evaluación de los factores del modelo de diseño inicial propuesto en el Capítulo 4. Como prueba de concepto del modelo, se utilizaron sus factores en el desarrollo de un AV que fue evaluado con adultos mayores. El objetivo de la evaluación fue determinar si la retroalimentación háptica tiene un efecto positivo en la adopción de la terapia motriz basada en el AV. Para lo anterior, se analizó el efecto de la retroalimentación háptica en fuertes indicadores de abandono de la terapia motriz, incluyendo: i) el desempeño de los participantes, ii) la carga de trabajo percibida en el ejercicio, iii) la percepción de usabilidad del dispositivo de interacción, y iv) los estados afectivos de los participantes al ejecutar el ejercicio. Durante el ejercicio de terapia de mano se utilizaron dos dispositivos de interacción, un dispositivo robótico de bajo costo (dispositivo háptico Novint Falcon [219]) y un sensor de gestos –no robótico- (Leap Motion Controller: LMC [220], [221]).

Dos grupos de adultos mayores participaron voluntariamente en la evaluación, un grupo sano (G1, n=15, grupo de control) y un grupo de adultos mayores con problemas motrices de brazo (G2, n=15, grupo de intervención). En la evaluación conducida se analizó el desempeño, la carga de trabajo y los estados afectivos de los participantes. También, se obtuvo la percepción de los participantes respecto a la utilidad, facilidad de uso y facilidad de aprendizaje de los dispositivos de interacción.

Las hipótesis principales de la evaluación conducida fueron:

H1) El desempeño de los participantes (eficiencia y precisión) con retroalimentación visual, auditiva y háptica es mayor respecto al desempeño con retroalimentación visual y auditiva.

H2) El desempeño (eficiencia y precisión) de los participantes del G1 es diferente respecto al de los participantes del G2.

H3) La carga de trabajo de los participantes con retroalimentación visual, auditiva y háptica es menor respecto a la carga de trabajo con retroalimentación visual y auditiva.

H4) La carga de trabajo de los participantes del G1 es diferente respecto a la carga de trabajo de los participantes del G2.

H5) Las emociones positivas de los participantes con retroalimentación visual, auditiva y háptica son mayores respecto a las emociones positivas con retroalimentación visual y auditiva.

H6) Las emociones negativas de los participantes con retroalimentación visual y auditiva son mayores respecto a las emociones negativas con retroalimentación visual, auditiva y háptica.

H7) Las emociones negativas de los participantes del G1 es diferente respecto a las emociones negativas de los participantes del G2.

5.1 Trabajo relacionado

El análisis del desempeño, la carga de trabajo y los estados afectivos permiten determinar la efectividad de una tarea mediante el uso de varios dispositivos o formas de proporcionar la retroalimentación al usuario. La Tabla 5.1 muestra un resumen de los trabajos relacionados identificados. Como se observa en la Tabla 5.1, hay varias investigaciones en donde se utilizan dos o más tipos de retroalimentación (esto es, visual, vibración y fuerza) y dispositivos de interacción para analizar el desempeño de los participantes en el AV [222], [223] o la transferencia del conocimiento del entorno virtual al mundo real [224].

Adicionalmente, se encontró que el LMC es una herramienta que puede ser usada en la rehabilitación de mano [225]–[229], a pesar de algunos problemas de desempeño reportados [220], [221]. Sin embargo, a pesar de que en todos estos trabajos de investigación se analiza el desempeño de los participantes, no se analiza la carga de trabajo o los estados afectivos de los participantes. La observación de los estados afectivos - emociones- de los usuarios permite a los diseñadores de las aplicaciones ver cómo es que la tecnología es utilizada en contexto. Además, la carga de trabajo puede ser usada para identificar posibles problemas de usabilidad con el dispositivo de interacción o el AV y su posible relación con los estados afectivos de los participantes. Lo anterior, es muy importante porque permite a los diseñadores por una parte, confirmar que han sido correctamente entendidas las necesidades de los usuarios y por otra parte explorar nuevas ideas de diseño [1]. Durante la interacción, los estados afectivos pueden expresarse y reconocerse mediante las expresiones faciales, el lenguaje, los movimientos del cuerpo y los parámetros fisiológicos [230]. De esta manera, la computación afectiva tiene el objetivo

de mejorar la interacción humano-computadora (HCI, por sus siglas en inglés) y la interacción robot-computadora (HRI, por sus siglas en inglés) mediante la comunicación afectiva para crear interacciones más intuitivas y entretenidas [230], [231]. Para lo anterior, es necesario reconocer los movimientos del cuerpo y gestos que definen las expresiones afectivas y comportamiento de los participantes de una forma automática [230] o manual [232]. En un diseño centrado en el usuario, esto permite no sólo identificar situaciones no descritas en los cuestionarios o mencionadas por los participantes [1], sino también conocer el efecto de la interacción con el sistema (p. ej. AV) de una manera no intrusiva [233]. De esta forma, es posible mejorar la aceptación del AV, reducir errores de diseño, reducir el tiempo de entrenamiento y la necesidad de ayuda desde otros, incrementar la efectividad del ejercicio realizado en el AV y mejorar la solución de diseño propuesta [233].

Los estados afectivos son analizados mientras los participantes conducen su ejercicio en el AV para entender el efecto de la retroalimentación o las estrategias de interacción utilizadas por los participantes (ver Tabla 5.1) [232], [234]–[236]. Sin embargo, en esas investigaciones utilizan un solo dispositivo de interacción que proporciona un tipo de retroalimentación (visual o háptica), lo que no permite identificar los estados afectivos en otras condiciones diferentes.

Por lo tanto, en este capítulo el interés es aplicar los factores del modelo en el desarrollo de un AV y evaluar el efecto de la retroalimentación háptica en el desempeño, carga de trabajo, estados afectivos y percepción de usabilidad como indicadores de la adopción o abandono de la terapia motriz y el diseño del AV. Se considera que con este análisis es posible entender cómo es que se utiliza el dispositivo de interacción y su influencia en el desempeño del ejercicio para determinar el esfuerzo usado en el mismo así como las emociones expresadas por los participantes. Con este conocimiento, es posible tomar decisiones de diseño de los AVs para individualizar el soporte proporcionado en la interacción y modificar en tiempo real el nivel de dificultad del ejercicio, entre otras cosas, con el fin de incrementar la posibilidad de adopción de la terapia.

Tabla 5.1. Resumen de trabajo relacionado en donde se analiza el efecto de la retroalimentación o dispositivo de interacción en el contexto de la rehabilitación motriz de extremidades superiores.

Autor, año, referencia	Breve descripción	Retroalimentación	Mediciones de resultado	Resultados principales
Cameirão et al. (2012) [224]	AV para la rehabilitación motriz de extremidades superiores	Sensor, exoesqueleto pasivo y háptica	Medidas clínicas	El beneficio en la rehabilitación depende del dispositivo de interacción utilizado para ejecutar el ejercicio
Weber et al. (2013) [222]	AV para la rehabilitación motriz de extremidades superiores	Visual, vibro táctil y háptica	Desempeño, carga de trabajo, usabilidad	La retroalimentación de fuerza del dispositivo robótico de mano mejora la precisión y la orientación espacial, y reduce la carga de trabajo
Appel et al. (2014) [234]	Juego serio para la rehabilitación motriz de extremidades superiores	Háptica	Estados afectivos usando imágenes termales	La detección automática de las emociones de los pacientes pueden influenciar positivamente el tratamiento respecto a parámetros de desempeño
Iosa et al. (2015) [225]	Juego serio para la rehabilitación motriz de mano	Visual (LMC)	Medidas clínicas	El dispositivo LMC puede ser una herramienta adecuada aun para adultos mayores con ECV subagudo
Petracca et al. (2015) [226]	AV para la rehabilitación de extremidades superiores	Visual (LMC)	Desempeño (trayectoria de movimiento)	La tarea propuesta puede ser usada en el campo de neurorrehabilitación con el potencial de ser adoptada en la evaluación funcional de las extremidades superiores
Morán et al. (2015) [232]	Herramienta de rehabilitación virtual para la estimulación cognitiva y activación física de adultos mayores	Visual (pinza)	Usabilidad y estados afectivos usando observación indirecta	La experiencia tecnológica previa tiene un efecto significativo en la percepción de disfrute de los adultos mayores
Rivas et al. (2015) [236]	AV para la rehabilitación motriz de extremidades superiores	Visual (pinza)	Estados afectivos usando observación indirecta	La predicción automática de los estados afectivos de los participantes pueden estimar adecuadamente la dificultad del ejercicio
Mottura et al. (2015) [235]	AV para la rehabilitación robótica de extremidades superiores	Háptica	Desempeño y estados afectivos usando auto-reporte	Las condiciones físicas y fisiológicas percibidas por los pacientes deben ser el foco central en las terapias
Vamsikrishna et	Sistema 3D para	Visual	Desempeño	El sistema puede ser usado

al. (2015) [229]	la rehabilitación de palma y dedos	(LMC)	(trayectoria de movimiento)	de desde casa sin supervisión de expertos
Smeragliuolo et al. (2016) [227]	Sistema 3D para la rehabilitación motriz de mano	Visual (LMC)	Desempeño (trayectoria de movimiento)	El dispositivo LMC es capaz de proporcionar datos con significado clínico para la flexión/extensión y desviación de muñeca
Taylor y Curran (2016) [228]	Juego serio para la rehabilitación motriz de mano	Visual (LMC)	Desempeño (tiempo de terminación de tarea, trayectoria de movimiento)	El dispositivo LMC puede usarse como herramienta para la rehabilitación de mano
Yu et al. (2016) [223]	Sistema 3D para la rehabilitación bilateral de extremidades superiores	Visual (LMC) y háptica	Desempeño (tiempo de terminación de tareas)	El cambio de nivel de dificultad como estrategia de entrenamiento

5.2 Metodología

5.2.1 AV con retroalimentación háptica

Se desarrolló un AV con retroalimentación háptica como prueba de concepto del modelo de diseño. La retroalimentación háptica es proporcionada con el dispositivo háptico Novint Falcon [219]. El dispositivo Novint Falcon es un robot con mecanismo paralelo de 3 grados de libertad con espacio de trabajo aproximado de 10.6 cm^3 . Para el desarrollo del AV se utilizó el sistema de creación de juegos Unity [237] y el software para el diseño de modelos en tres dimensiones Blender [238]. El paciente en el AV se representa por un proxy (avatar) que se mueve en el espacio de 3 dimensiones. Para la detección de las colisiones en el AV se utilizaron las bibliotecas de Unity, además se usó el método de penalización para generar la retroalimentación háptica a los pacientes [239], [240].

El objetivo principal del desarrollo del laberinto con retroalimentación háptica fue fortalecer la fuerza de la muñeca del paciente y mejorar su precisión de movimiento. El AV se conforma de tres componentes principales (ver Figura 5.1): a) la configuración donde el terapeuta ocupacional selecciona no sólo las características visuales del AV, sino también el número de repeticiones y el peso del proxy simulado con retroalimentación háptica; b) el laberinto háptico; y c) los resultados del ejercicio donde el paciente puede observar su desempeño.

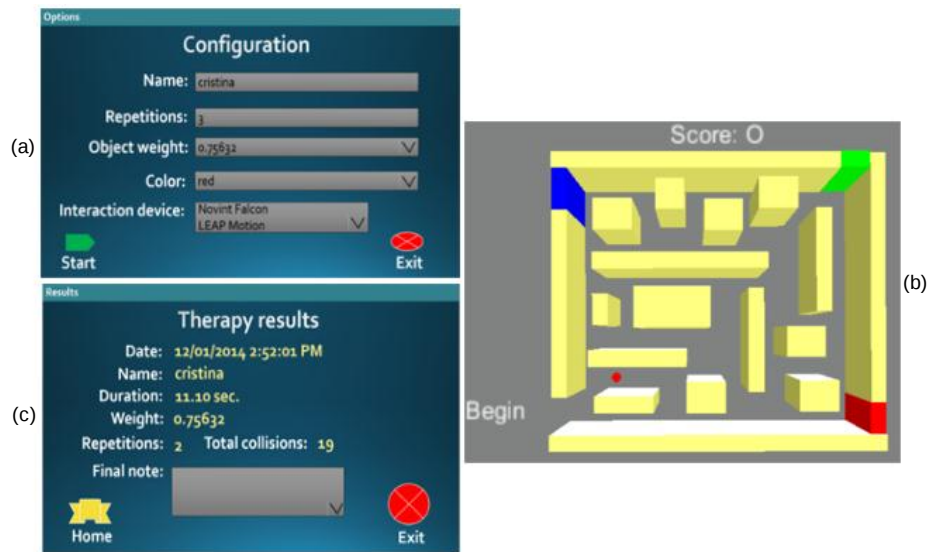


Figura 5.1. AV con retroalimentación háptica: a) configuración del ejercicio, b) AV con retroalimentación háptica, c) resultados de la terapia.

5.2.2 Participantes

Dos grupos de 15 participantes fueron reclutados. En el grupo de control (G1), 15 adultos sanos (8 mujeres y 7 hombres, edad promedio 55.73 ± 7.56 años) fueron los participantes quienes viven de forma independiente y no tienen un problema motriz aparente. En el grupo de intervención (G2), 15 adultos mayores (8 mujeres y 7 hombres, edad promedio 78.80 ± 11.30 años) fueron reclutados de la “Casa Hogar del Anciano” y la “Casa del Abuelo”, localizadas en Ensenada, Baja California, México. Los participantes del grupo de intervención (G2) fueron previamente seleccionados por sus cuidadores y terapeutas físicos, considerando que no presentaban un problema cognitivo aparente, y por tener las capacidades motrices necesarias para conducir la tarea. Además, sólo el 50% de los adultos sanos declararon tener experiencia en el uso de la computadora, y ninguno de ellos declaró tener experiencia en el uso de dispositivos hápticos o sensores de movimiento. Las características de los participantes se presentan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Datos demográficos de los participantes.

	Grupo de control (G2) n=15	Grupo de intervención (G2) n=15
Edad, año	55.73 $\pm$ 7.56, 50-75	78.80 $\pm$ 11.30, 64-96
Género, H/M	7/8	7/8
Mano dominante, I/D	2/13	1/14
Problema motriz de mano/número de participantes	---	Artritis reumatoide/8 Osteoartritis/5 Enfermedad cerebrovascular/2

5.2.3 Diseño experimental y procedimiento

El diseño experimental siguió el paradigma *within subjects*, esto es, ambos grupos realizaron las tareas siguiendo las condiciones:

C1. AV con retroalimentación háptica, visual y auditiva con el dispositivo de interacción Novint Falcon (ver parte superior de la Figura 5.2).

C2. AV con retroalimentación visual y auditiva con controlador de gestos Leap Motion (ver parte inferior de la Figura 5.2).



Figura 5.2. Participantes conduciendo el ejercicio con el dispositivo háptico Novint Falcon (arriba) y el controlador Leap Motion (abajo): adulto sano sin problemas motrices (izquierda) y adulto mayor con problemas motrices (derecha).

La condición experimental fue asignada de forma aleatoria a los participantes cuando ejecutaron su ejercicio con el fin de evitar sesgo (aprendizaje o fatiga). Antes de la ejecución del ejercicio, los participantes usaron por 1 minuto de manera libre el AV para familiarizarse con la tarea y el dispositivo de interacción.

Los participantes firmaron un formato de consentimiento y aceptaron ser video-grabados durante la ejecución del ejercicio. Para lo anterior, se utilizó el software Camtasia. Los participantes de ambos grupos realizaron una tarea con cada condición que consistió en mover un objeto a través del laberinto y virtualmente “tocar” tres puertas de colores diferentes en el orden indicado –rojo, verde y azul- (ver Figura 5.3) con un proxy con peso simulado de 100 gramos (cuando utilizaron el dispositivo háptico). Mientras movían el objeto a través del laberinto, si el participante colisionaba con una pared obtenía retroalimentación visual, auditiva y háptica (ver parte superior de la Figura 5.2) o retroalimentación visual y auditiva (ver parte inferior de la Figura 5.2).

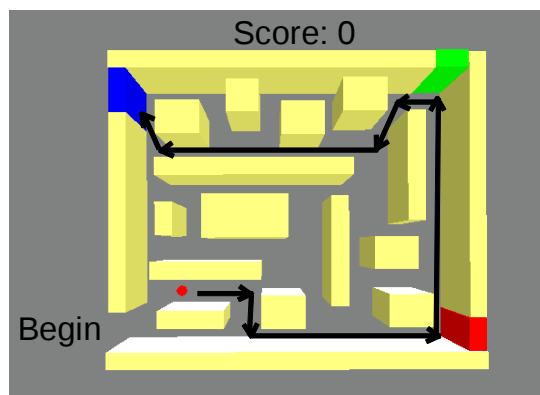


Figura 5.3. Ejercicio en el laberinto háptico. La trayectoria de movimiento está señalada con negro. El proxy (punto rojo) cambia su color para indicar la siguiente puerta a tocar siempre y cuando se haya tocado la puerta correcta según el color del proxy y el orden indicado (rojo, verde y azul).

Después de realizar cada ejercicio utilizando cualquiera de los dispositivos de interacción los participantes contestaron un cuestionario NASA Task Load Index (TLX) con 20 posiciones no numeradas en el rango del 1 al 100 [241]. El cuestionario NASA-TLX usa seis dimensiones para evaluar la carga de trabajo: demanda mental, demanda física, demanda temporal, desempeño, esfuerzo y frustración. La Tabla 5.3 presenta las

dimensiones del cuestionario NASA-TLX. Además, después de conducir los ejercicios con ambos dispositivos de interacción se les preguntó a los participantes lo siguiente: (a) ¿cuál dispositivo de interacción considera que le proporciona resultados más efectivos para el ejercicio de rehabilitación?, (b) ¿cuál de los dos dispositivos fue más fácil de usar?, (c) ¿cuál de los dos dispositivos fue más fácil de aprender para conducir la tarea?. Por último, los participantes expresaron su percepción respecto a la experiencia de usar el AV y los dispositivos de interacción.

Tabla 5.3. Escala, criterios de valoración y descripción del cuestionario NASA-TLX [241].

Título	Criterios de valoración	Descripción
Demanda mental	Baja/Alta	¿Qué tan mentalmente demandante fue la tarea?
Demanda física	Baja/Alta	¿Qué tan psicológicamente demandante fue la tarea?
Demanda temporal	Baja/Alta	¿Qué tan apurado o apresurado fue el ritmo de la tarea?
Desempeño	Perfecto/Fallido	¿Qué tan exitoso fue lo que logró respecto a lo que se le pidió hacer?
Esfuerzo	Baja/Alta	¿Qué tan duro tuvo que trabajar para lograr su nivel de desempeño?
Nivel de frustración	Baja/Alta	¿Qué tan inseguro, irritado, estresado, desanimado se sintió?

Finalmente, se observó el comportamiento de los participantes mientras conducían la tarea en el AV con el fin de complementar los resultados de desempeño, carga de trabajo, usabilidad, facilidad de uso y facilidad de aprendizaje expresada por los participantes. Para determinar las emociones de los participantes se utilizó una combinación de las emociones básicas de los modelos propuestos por Tomkins [242] y Ekman [243]. En total, se consideraron 7 emociones básicas: dos positivas (diversión, interés), una neutral (sorpresa), y cuatro negativas (frustración, incomodidad, miedo, tristeza) (ver Tabla 5.4). Con estas emociones básicas, se revisaron y analizaron mediante teoría de la actividad [1], los videos de los participantes mientras ejecutaron el ejercicio de rehabilitación para identificar manualmente sus expresiones afectivas y su comportamiento.

Tabla 5.4. Emociones básicas utilizadas para analizar y clasificar las expresiones faciales y corporales de los participantes.

Tipo de emoción	Emoción	Expresión facial o corporal
Positiva	Diversión	Sonrisa, labios amplios y hacia afuera [242], [243]
	Interés	Ojos observando [242], [243], siguiendo las instrucciones, concentrado en la actividad
Neutral	Sorpresa	Parpadeo de ojos [242], [243]
Negativa	Frustración	Con el ceño fruncido, la mandíbula apretada, la cara roja [242], [243], moviendo la cabeza de un lado a otro, se pregunta a sí mismo que está pasando
	Incomodidad	Pregunta cuándo va a terminar el ejercicio, usa su otra mano como apoyo para realizar/terminar el ejercicio
	Miedo	Una mirada congelada, una cara pálida, sudor, sensación de frío, pelo erguido [242], [243]
	Tristeza	Abandona el ejercicio y dice que no puede realizarlo/terminarlo

5.2.4 Medidas de resultado

En el análisis de desempeño de los participantes, se obtuvo por cada condición experimental la eficiencia (tiempo de ejecución de la tarea) y la precisión del ejercicio (número de colisiones con las paredes del laberinto). Estos parámetros están relacionados con la coordinación vista mano, la sensibilidad, el rango de movimiento, la propiocepción y la fuerza muscular, las cuales son algunas de las funciones básicas que necesitan mantenerse o retenerse en los adultos mayores con problemas motrices de brazo [161]. Para evaluar la percepción de carga de trabajo de los participantes, se utilizó en cada condición experimental el cuestionario de auto-reporte NASA-TLX. Además, se obtuvo la percepción de usabilidad de los dispositivos de interacción usando tres preguntas finales después de cada condición experimental. Finalmente, los estados afectivos fueron obtenidos al analizar los videos de los participantes.

5.2.5 Análisis estadístico

El software Arena fue utilizado para analizar los datos [244]. Un análisis primario de normalidad (herramienta Input Analyzer) indicó que las variables de salida no estaban normalmente distribuidas (las distribuciones obtenidas fueron: beta, exponencial, triangular y weibull). Por lo anterior, se aplicó un análisis estadístico no paramétrico. La prueba no

paramétrica de una cola Mann-Whitney U [245] fue usada para analizar el desempeño (hipótesis H1), la carga de trabajo (hipótesis H3) y los estados afectivos (hipótesis H5 y H6) entre las dos condiciones experimentales. Además, la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis y la prueba de dos colas de Nemenyi [245] fueron utilizadas en el análisis de varianza. Ambas pruebas fueron usadas para analizar el desempeño (hipótesis H2), la carga de trabajo (hipótesis H4) y los estados afectivos (hipótesis H7) entre dispositivos y grupos.

5.3 Resultados

5.3.1 Datos de desempeño: eficiencia y precisión

Los ejercicios fueron evaluados usando los datos objetivos de desempeño de los participantes en el AV, específicamente, el tiempo de ejecución de la tarea (eficiencia) y el número de colisiones detectadas en las paredes del laberinto virtual (precisión del ejercicio). La Figura 5.4 presenta un resumen de los puntajes obtenidos por cada grupo.

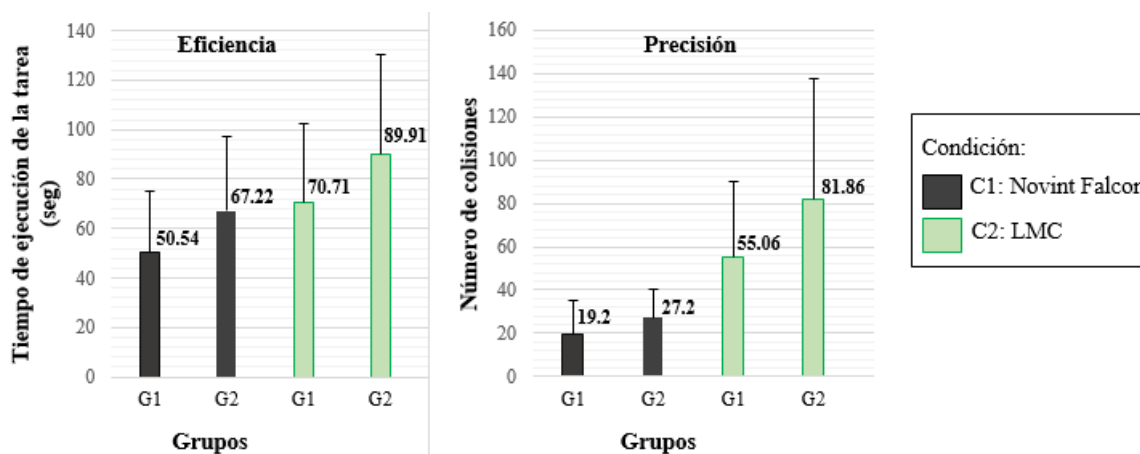


Figura 5.4. Resultados de la evaluación del ejercicio (media y desviación estándar) en términos del desempeño: eficiencia (tiempo de ejecución de la tarea) y precisión (número de colisiones). G1: grupo de control, G2: grupo de intervención.

Se analizaron los resultados de la efectividad de la terapia en términos del desempeño de ambos grupos (ver Tabla 5.6). Como se observa en la Tabla 5.5 no se encontraron diferencias significativas entre ambas condiciones experimentales en el tiempo de terminación de la tarea (eficiencia). Sin embargo, se encontraron diferencias significativas en la precisión de movimiento. Adicionalmente, la Tabla 5.5 muestra los resultados del análisis entre grupos y dispositivos donde se encontraron diferencias significativas en el

tiempo de ejecución (eficiencia) entre G1 usando el dispositivo háptico Novint Falcon y G2 usando el LMC. Además, se encontraron diferencias significativas en la precisión de movimiento entre G1 utilizando el dispositivo Novint Falcon y G2 usando el controlador Leap Motion.

Tabla 5.5. Resultados de la prueba estadística Mann-Whitney U [245] en la hipótesis H1 (valor crítico $U_{\alpha(1),15,15}=169$, intervalo de confianza de 99%) entre dispositivos, y la prueba estadística Nemenyi [245] en la hipótesis H2 (valor crítico $q_{\alpha,\infty,4}=3.98$, intervalo de confianza de 97.5%) entre dispositivos y grupos. G1: grupo de adultos sanos. G2: grupo de adultos mayores con problemas motrices de brazo.

Hipótesis	Grupo o comparativa	Valor estadístico	Significado de la diferencia
H1 (eficiencia, $\alpha=0.01$)	G1	166	No significativa
	G2	147	No significativa
H1 (precisión, $\alpha=0.01$)	G1	213.5	Significativa
	G2	201	Significativa
H2 (eficiencia, $\alpha=0.025$)	G1 con Leap vs G2 con Leap	1.65	No significativa
	G1 con Leap vs G2 con Novint	0.28	No significativa
	G1 con Novint vs G2 con Leap	4.47	Significativa
	G1 con Novint vs G2 con Novint	2.54	No significativa
H2 (precisión, $\alpha=0.025$)	G1 con Leap vs G2 con Leap	1.34	No significativa
	G1 con Leap vs G2 con Novint	3.31	No significativa
	G1 con Novint vs G2 con Leap	7.14	Significativa
	G1 con Novint vs G2 con Novint	2.49	No significativa

5.3.2 Datos subjetivos: carga de trabajo y percepción de utilidad, facilidad de uso y facilidad de aprendizaje

La Figura 5.5 presenta un resumen de los resultados de la carga de trabajo percibida por los participantes. Como se puede ver en la Tabla 5.6, no se encontró una diferencia significativa para el grupo G1 en la carga de trabajo entre ambos dispositivos, pero si se encontró para el grupo G2. Analizando cada subescala de la carga de trabajo para el grupo

G2 con un valor crítico: $U_{.01(1),15,15}=169$, no se encontraron diferencias significativas en la carga mental ($U=152$), desempeño ($U=63$) y nivel de frustración ($U=158.5$). Sin embargo, si se encontraron diferencias significativas en el grupo G2 en la demanda física ($U'=174.5$), la demanda temporal ($U'=192$) y el esfuerzo ($U'=187$).

Finalmente, la Tabla 5.6 muestra las diferencias significativas encontradas en la carga de trabajo entre ambos dispositivos y grupos para G1 usando el controlador Leap Motion y G2 usando el controlador Leap Motion, también para G1 usando el dispositivo háptico Novint Falcon y G2 usando el controlador Leap Motion.

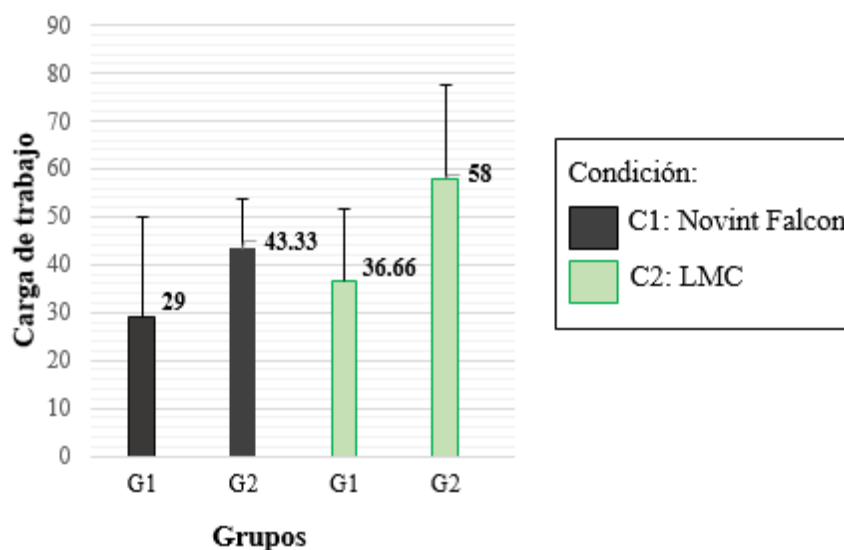


Figura 5.5. Resultados de la evaluación (mediana e IQR: *Interquartile Rank*) en términos de la carga de trabajo (demanda mental, física, temporal, esfuerzo, nivel de frustración y desempeño). G1: grupo de control, G2: grupo de intervención.

Tabla 5.6. Resultados de la prueba estadística Mann-Whitney U [245] en la hipótesis H2 (valor crítico $U_{\alpha(1),15,15}=169$, intervalo de confianza de 99%) entre dispositivos, y la prueba estadística Nemenyi [245] en la hipótesis H3 (valor crítico $q_{\alpha,\infty,4}=3.98$, intervalo de confianza de 97.5%) entre dispositivos y grupos. G1: grupo de adultos sanos. G2: grupo de adultos mayores con problemas motrices de brazo.

Hipótesis	Grupo o comparativa	Valor estadístico	Significado de la diferencia
H2 (carga de trabajo, $\alpha=0.01$)	G1	135	No significativa
	G2	189.5	Significativa
H3 (carga de	G1 con Leap vs G2 con	5.11	Significativa

trabajo, $\alpha=0.025$)	Leap		
	G1 con Leap vs G2 con Novint	1.10	No significativa
	G1 con Novint vs G2 con Leap	6.17	Significativa
	G1 con Novint vs G2 con Novint	2.17	No significativa

La Figura 5.6 muestra los resultados de las preguntas adicionales realizadas a ambos grupos (G1 y G2): (a) ¿cuál dispositivo de interacción considera que le proporciona resultados más efectivos para el ejercicio de rehabilitación?, (b) ¿cuál de los dos dispositivos fue más fácil de usar?, (c) ¿cuál de los dos dispositivos fue más fácil de aprender para conducir la tarea?. Como se puede ver en la Figura 5.6, 80% de los participantes de G1 y el 86.7% de G2 consideran que el dispositivo háptico Novint Falcon tiene una mayor utilidad (a). Adicionalmente, la Figura 5.6 muestra los resultados de la percepción de facilidad de uso (b), donde 86.7% de los participantes de G1 y el 80% de los participantes de G2 considera que el dispositivo háptico Novint Falcon es más fácil de usar. Por último, respecto a la facilidad de aprendizaje (c), 86.7% de los participantes de G1 y 80% de G2 considera que el dispositivo háptico Novint Falcon es más fácil de aprender (ver Figura 5.6).

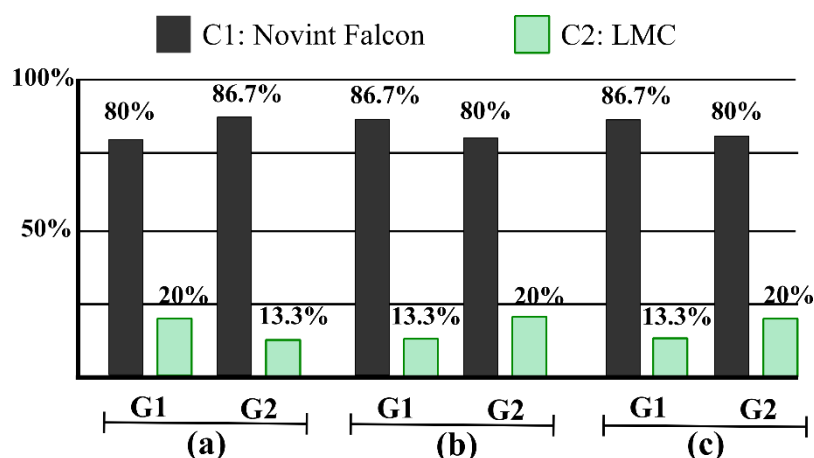


Figura 5.6. Resultados de las preguntas a ambos grupos (G1 y G2): (a) ¿cuál dispositivo de interacción considera que le proporciona resultados más efectivos para el ejercicio de rehabilitación?, (b) ¿cuál de los dos dispositivos fue más fácil de usar?, (c) ¿cuál de los dos dispositivos fue más fácil de aprender para conducir la tarea?.

Siguiendo las conversaciones con los participantes, dos tópicos adicionales emergieron respecto a la percepción de utilidad, facilidad de uso y facilidad de aprendizaje de los

dispositivos, los cuales se denominaron control de la tarea y apoyo de la tarea; una breve explicación se da a continuación.

- **Control de la tarea.** Este tema emergió de la evaluación con los participantes porque ellos consideran que tienen mayor control al conducir la tarea por medio del dispositivo háptico. Ellos mencionaron que eran capaces de sincronizar su movimiento en la tarea en tiempo real. Esto se reflejó estadísticamente en los participantes porque fueron más precisos y los participantes del grupo G2 percibieron una carga de trabajo menor (ver Tablas 5.4 y 5.5). Algunos comentarios del grupo G1 fueron: *“considero que el dispositivo hace lo que yo quiero que haga, es más útil”* (P6), *“con el dispositivo Novint la dificultad de la tarea puede ser cambiada gradualmente, lo que hace mayor el reto”* (P8), *“el Novint es más útil porque si te obedece, el otro no [te obedece]”* (P14). Mientras que algunos de los comentarios del grupo G2 fueron: *“el Novint es más útil porque cuando chocas [con la pared] tú lo sientes”* (P4), *“esto es realmente nuevo, puedo sentir si toco algo”* (P9).
- **Apoyo en la tarea.** Otro tema que emergió es que los participantes mencionaron que se sintieron apoyados en la tarea mientras usaron el dispositivo háptico. Lo anterior, porque sentían en sus movimientos cuando el proxy (su representación en el AV) colisionaba con las paredes del laberinto. Esta percepción de ayuda o soporte fue reflejada en las diferencias significativas de la precisión de la tarea (ver Tabla 5.4). Algunos de los comentarios de los participantes de G1 fueron: *“es más fácil con el dispositivo Novint Falcon porque puedes sentir el movimiento que estás haciendo”* (P3), *“siento que es más fácil [con el Novint] y me siento más seguro mientras ejecuto el ejercicio”* (P5). Algunos comentarios de G2 fueron: *“es más fácil mover la mano con el dispositivo Novint que estar moviendo la mano en el aire”* (P5), *“es más fácil [con el dispositivo Novint Falcon] porque es más fácil sostenerte con una manija respecto a mantener tu mano en el aire”* (P6), *“es más simple [con el dispositivo Novint Falcon] porque sientes que algo está sosteniendo tu brazo”* (P9), *“es más fácil [con el dispositivo Novint Falcon] porque algo está sosteniendo y guiando tu brazo”* (P10).

5.3.3 Estados afectivos percibidos (observación indirecta)

En total se analizaron 30:26:15 minutos de las grabaciones de emociones en el grupo de adultos sanos (G1) y 39:24:26 minutos en el grupo de adultos mayores con problemas motrices en sus brazos (G2) (ver Figura 5.7). En el análisis dentro de los grupos de las emociones positivas no se encontraron diferencias significativas para ambos grupos (ver Tabla 5.7). Sin embargo, en las emociones negativas si se encontraron diferencias significativas en el grupo G2, las cuales fueron mayores cuando los participantes utilizaron el LMC. Adicionalmente, la Tabla 5.7 muestra las diferencias significativas en las emociones negativas entre el grupo G1 usando el LMC y el grupo G2 usando el LMC. Además, encontramos diferencias significativas en las emociones negativas entre el grupo G1 usando el dispositivo háptico Novint Falcon y el grupo G2 utilizando el LMC.

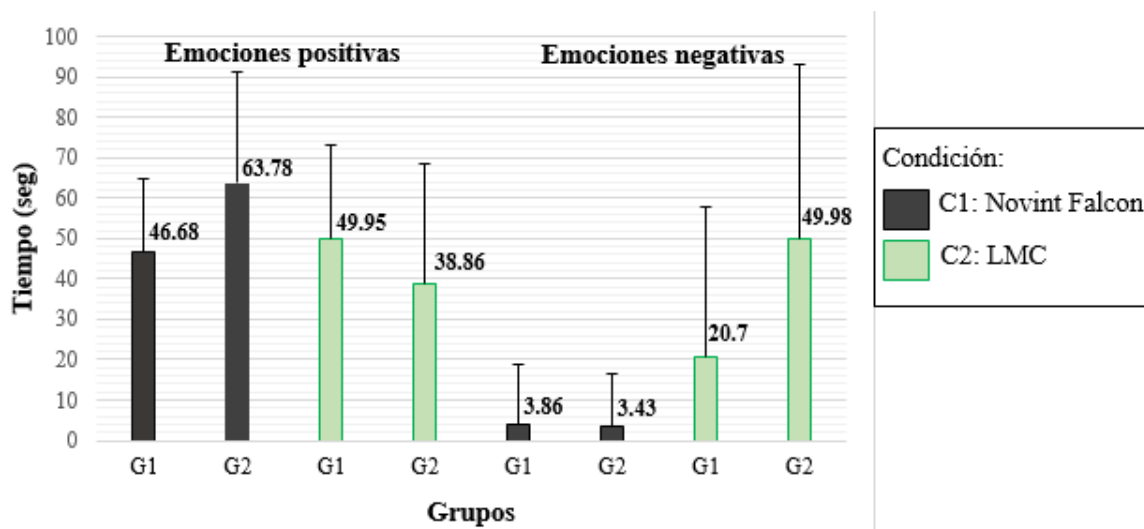


Figura 5.7. Resultados de la evaluación del ejercicio (media y desviación estándar) en términos de los estados afectivos (positivo y negativo). G1: grupo de control, G2: grupo de intervención.

Tabla 5.7. Resultados de la prueba estadística Mann-Whitney U [245] en la hipótesis H5 y H6 (valor crítico $U_{\alpha(1),15,15}=169$, intervalo de confianza del 99%) entre dispositivos, y la prueba estadística Nemenyi [245] en la hipótesis H7 (valor crítico $q_{\alpha,\infty,4}=3.98$, intervalo de confianza de 97.5%) entre dispositivos y grupos. G1: grupo de adultos sanos. G2: grupo de adultos mayores con problemas motrices de brazo.

Hipótesis	Grupo o comparativa	Valor estadístico	Significado de la diferencia
H5 (emociones positivas, $\alpha=0.01$)	G1	98	No significativa
	G2	158	No significativa
H6 (emociones negativas, $\alpha=0.01$)	G1	125	No significativa
	G2	211	Significativa
H7 (emoción negativa, $\alpha=0.025$)	G1 con Leap vs G2 con Leap	4.52	Significativa
	G1 con Leap vs G2 con Novint	1.92	No significativa
	G1 con Novint vs G2 con Leap	6.09	Significativa
	G1 con Novint vs G2 con Novint	3.48	No significativa

5.4 Discusión

El objetivo de este capítulo fue utilizar el modelo de diseño para el desarrollo de un AV y determinar el efecto de la retroalimentación háptica en la carga de trabajo, las emociones y el desempeño de los participantes mientras ejecutaban un ejercicio mediante dos dispositivos de interacción. Para lograrlo, primeramente se realizó una evaluación donde los participantes ejecutaron un ejercicio de terapia de extremidades superiores usando el dispositivo háptico Novint Falcon y el controlador Leap Motion.

Los resultados de desempeño de los participantes coinciden con los establecidos por Bachmann et al. [220], donde se establece que una interacción humano computadora eficiente y efectiva está fuertemente influenciada por los dispositivos de entrada. Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que la precisión de los participantes fue significativamente mejor cuando usaron el dispositivo háptico, lo cual pudo ser por la facilidad de delimitar el ejercicio [73], [132]. Además, estos resultados coinciden con los establecidos por Cameirão et al. [224] y Weber et al. [222] en donde se sugiere que la

retroalimentación háptica durante la ejecución mejora el desempeño de los participantes. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en el tiempo de terminación del ejercicio. Este comportamiento se vio reflejado en el análisis entre grupos y dispositivos en donde se determina que no existe diferencia en el desempeño, excepto cuando G1 utiliza el dispositivo háptico Novint Falcon y G2 utiliza el LMC. Lo anterior, sugiere que la retroalimentación háptica ayuda a equilibrar las capacidades disminuidas del grupo de intervención (G2, adultos mayores con problemas motrices de brazo) en contraste con el grupo de control (G1, adultos sanos).

Respecto a la carga de trabajo (NASA-TLX), los resultados establecen que los participantes del G1 percibieron la misma carga al utilizar cualquiera de los dispositivos. Sin embargo, a los participantes del G2 (adultos mayores con problemas motrices de brazo) les causó mayor carga de trabajo el LMC. Más de la mitad de los participantes del G2 (9 de 15) tuvieron que sostener su mano durante la ejecución del ejercicio para poder terminar la tarea con el LMC. Lo anterior se confirma con las diferencias significativas encontradas en las subescalas de demanda física, demanda temporal y esfuerzo. Además, se encontraron diferencias significativas en la carga de trabajo entre grupos cuando utilizaron el controlador Leap Motion y cuando G1 utilizó el dispositivo háptico Novint Falcon y G2 el controlador Leap Motion. Esto sugiere que la retroalimentación háptica ayudó al grupo de intervención (G2) para equilibrar sus problemas motrices y reducir el esfuerzo físico (fatiga) para completar el ejercicio.

Además, los resultados de este trabajo sugieren que las características demográficas y habilidades motrices de los participantes no influenciaron su percepción de utilidad, facilidad de uso y facilidad de aprendizaje de la retroalimentación proporcionada por los dispositivos de interacción (ver Figura 5.6). Ambos grupos consideraron que el dispositivo háptico Novint Falcon es más útil, fácil de usar y fácil de aprender para conducir el ejercicio de terapia respecto al LMC.

Adicionalmente, en los comentarios finales de la evaluación varios participantes de ambos grupos sintieron que el LMC no reflejaba correctamente sus movimientos. Esto coincide con lo reportado por Guna et al. [221] y Bachmann et al. [220]. Por un lado, Guna et al. [221] establece que “los resultados del escenario dinámico revelan la inconsistencia del desempeño del controlador, con una pérdida de precisión significativa en muestras tomadas

250 milímetros por encima del controlador. El LMC indudablemente representa un dispositivo de entrada revolucionario para la interacción humano computadora basada en gestos. Sin embargo, debido a su limitado espacio de trabajo e inconsistencia de muestreo de frecuencia en su configuración actual no puede ser utilizado como un sistema de seguimiento profesional”. Por otro lado, Bachmann et al. [220] establece que el desempeño del dispositivo Leap Motion tiene limitaciones para ser utilizado en tareas de la vida diaria. Adicionalmente, Smeragliuolo et al. [227] establece que el LMC no reconoce algunas trayectorias de mano que son necesarias de analizar para validar el progreso de los pacientes mediante pruebas clínicas. Sin embargo, en Iosa et al. [225], Petracca et al. [226], Smeragliuolo et al. [227], Taylor y Curran [228], Vamsikrishna et al. [229] y Yu et al. [223] se utiliza el LMC como único dispositivo de entrada en la ejecución de una terapia motriz de mano y en sus resultados no reportan alguna falla de desempeño del dispositivo. Sin embargo, una posible explicación de lo anterior con respecto al presente trabajo de investigación, es que durante la interacción, los participantes no tienen otro dispositivo de entrada que les permita compararlo y por ello es posible que las fallas de desempeño no fueron percibidas.

En el análisis de las emociones positivas de los participantes no se encontraron diferencias significativas. La falta de diferencias significativas en las emociones positivas es posible explicarlas por el modelo de interacción usado basado en la acción de tareas [246]. En este modelo de interacción, acciones específicas son planeadas e implementadas como parte de las tareas del usuario y entonces el éxito de esas acciones es evaluado. Por lo tanto, como se presenta en las Figuras 5.8 y 5.9 los participantes se enfocaron en realizar el ejercicio asignado mostrando interés por concluirlo y no en su disfrute. Además, esto sugiere que los participantes estuvieron muy dispuestos a realizar el ejercicio y que la novedad del ejercicio realizado con ambos dispositivos los motivó a estar concentrados en terminar el ejercicio a pesar de la incomodidad y frustración generada con el LMC.

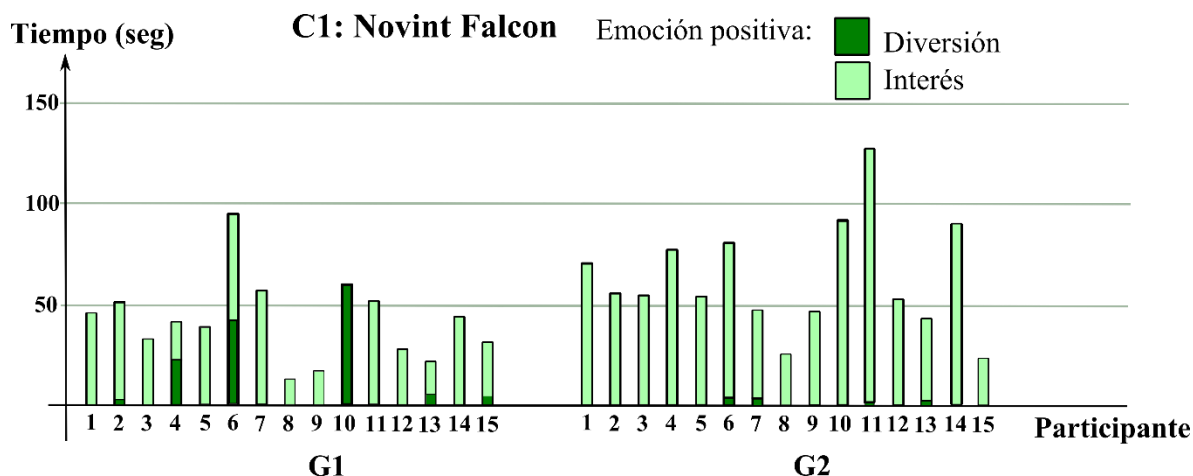


Figura 5.8. Emociones positivas de ambos grupos utilizando el dispositivo háptico Novint Falcon.

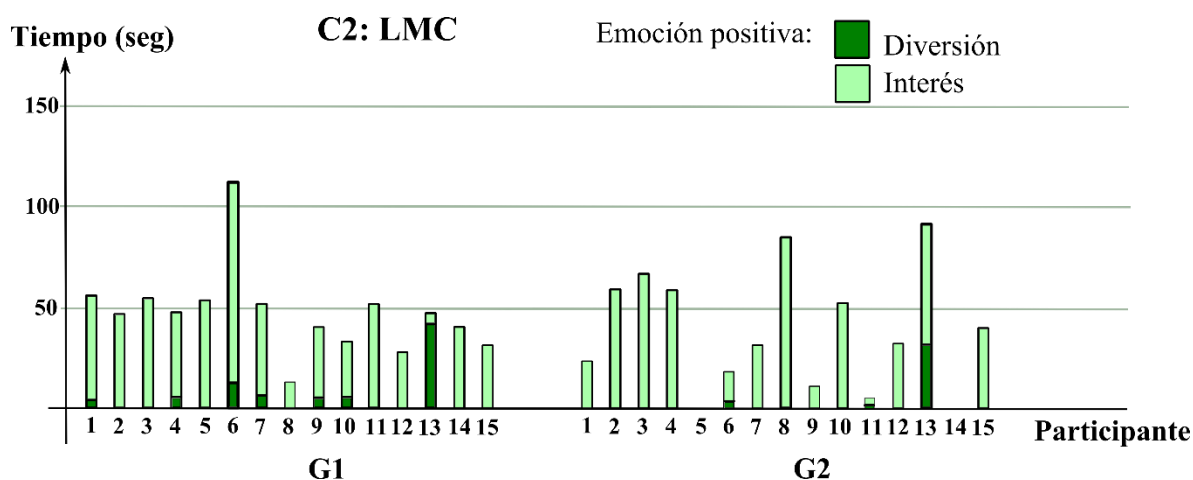


Figura 5.9. Emociones positivas de ambos grupos utilizando el LMC.

Adicionalmente, las diferencias significativas de las emociones negativas en G2 cuando utilizaron el controlador Leap Motion muestran el alto nivel de las emociones de frustración e incomodidad. Con base en estos resultados con el controlador Leap Motion, en la Figura 5.10 se presenta un análisis individual de las emociones negativas en G2. Este análisis muestra que nueve participantes estuvieron incomodos y fatigados, lo cual los motivó a usar su otra mano para sostenerse y ayudarse a completar el ejercicio (P1, P2, P3, P4, P6, P8, P10, P11 y P14). Además, dos participantes en G2 (P2 y P9) abandonaron por un momento el ejercicio y expresaron que se sentían tristes comentando “que ellos consideraban no tener la capacidad física para terminar por ellos mismos el ejercicio”.

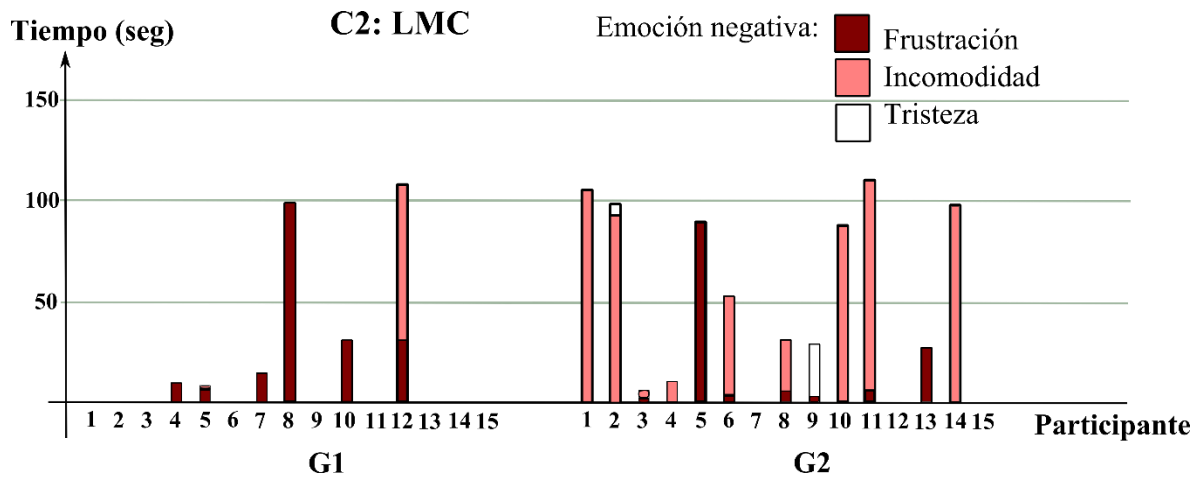


Figura 5.10. Emociones negativas para los participantes de ambos grupos utilizando el LMC.

La Figura 5.11 muestra que las emociones negativas de G1 usando el controlador LMC se debieron principalmente a la frustración de los participantes. Esta frustración en G1 (70.68% del total) fue causada porque los participantes mencionaron que el dispositivo no reflejaba o respondía de la forma en que ellos deseaban que respondiera. Mientras que la emoción negativa de incomodidad en G1 (29.32%) se debió a que los participantes tenían que sostener su mano para completar la tarea usando el LMC (ver G1, P12 de la Figura 5.10). Como se aprecia en la Figura 5.11, 55.59% del tiempo de ejecución usando el LMC en los participantes de G2 experimentaron emociones negativas (18.28% frustración, 77.36% incomodidad y 4.36% tristeza).

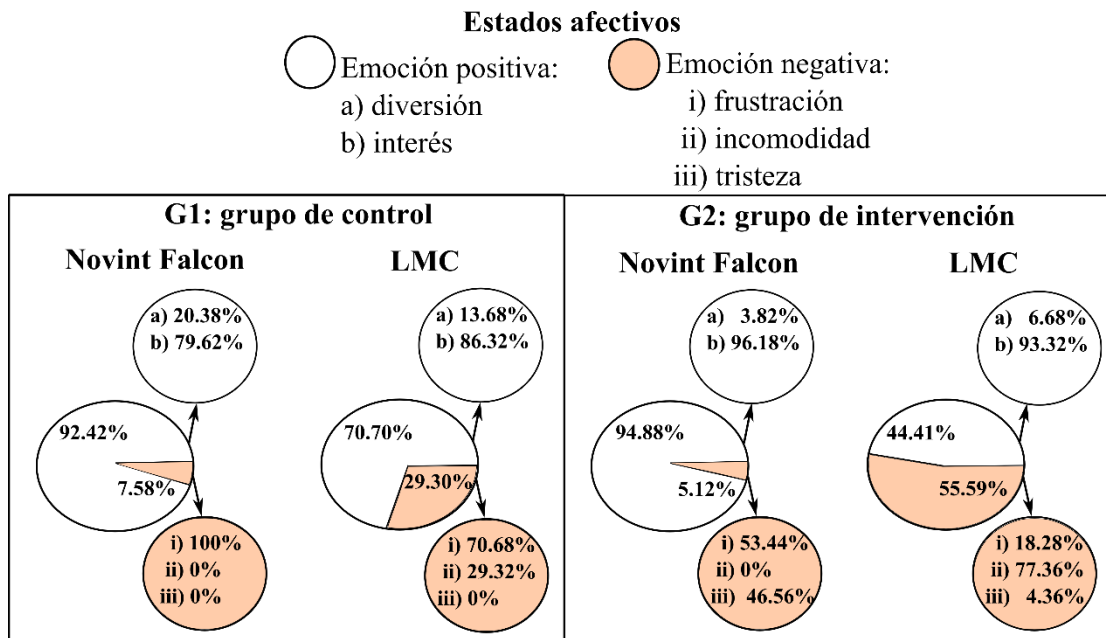


Figura 5.11. Resultado de los estados afectivos por tipo de emoción para ambos grupos (G1 y G2).

De esta manera, con los resultados de la evaluación se tiene evidencia de que existe una relación entre el comportamiento de los participantes (frustración o incomodidad) y las diferencias significativas encontradas en la carga de trabajo en el grupo G2 respecto a las subescalas de demanda física, demanda temporal y esfuerzo. Por lo tanto, si se tiene conocimiento en tiempo real de las emociones de los participantes cuando interactúan con el sistema (p. ej. AV) es posible individualizar la interacción.

Esta adaptabilidad para individualizar el nivel de dificultad de la tarea sugiere la posibilidad de influenciar positivamente las emociones, la carga de trabajo y el desempeño de los participantes. Para esto, es posible utilizar métodos de cómputo afectivo para automatizar el reconocimiento de emociones (ver por ejemplo Karg et al. [230]). Así, el monitoreo en tiempo real de los participantes permite la adecuación de las tareas solicitadas y mejorar su motivación como elementos clave en la adopción de la terapia y el diseño del AV.

Además, los resultados de la evaluación proporcionan evidencia de los beneficios de la retroalimentación háptica con la provisión del apoyo en tiempo real y control durante la ejecución del ejercicio motriz para las personas con capacidades físicas disminuidas respecto al uso de dispositivos gestuales como el LMC. El efecto del apoyo de la retroalimentación háptica sugiere algunas ventajas que son necesarias para mantener motivados a los participantes y adaptar el nivel de dificultad usando el dispositivo de

interacción para generar en los participantes menor carga de trabajo durante el ejercicio de terapia. Aunque en Iosa et al. [225], Petracca et al. [226], Smeragliuolo et al. [227], Taylor y Curran [228], Vamsikrishna et al [229], y Yu et al. [223] sugieren que el LMC puede ser usado en la terapia de rehabilitación de mano, ellos no consideran que la falta de apoyo en la retroalimentación del dispositivo de interacción puede generar emociones negativas y carga de trabajo en los participantes. Este incremento en las emociones negativas y carga de trabajo incrementa el grado de dificultad de los ejercicios y puede inducir a los participantes a abandonar la terapia.

Adicionalmente, con esta evaluación se resalta la importancia de la combinación del análisis de desempeño, carga de trabajo y estados afectivos como estrategia para entender los efectos del tipo de retroalimentación que es proporcionada a los usuarios durante su interacción con el AV. Los resultados de este trabajo sugieren una conexión directa entre el desempeño de los participantes, sus emociones y su carga de trabajo de la tarea. Asimismo, estos resultados proporcionan evidencia de una posible explicación de la alta percepción de utilidad, facilidad de uso y facilidad de aprendizaje de los participantes del dispositivo háptico Novint Falcon en comparación con el LMC.

Igualmente, con base en los resultados de la evaluación emergen algunas guías de diseño para los AVs. En las áreas de HCI y HRI es necesario crear sistemas que no sólo sean correctos, sino que también sean usables y generen experiencias placenteras en la población objetivo [1]. Así, los resultados de esta evaluación generan conocimiento para ayudar a los desarrolladores a incrementar la posibilidad de adopción de los AVs para la terapia motriz. Las guías de diseño (DG) propuestas se presentan a continuación.

DG1. Selección del dispositivo de interacción y despliegue según las capacidades de los pacientes. Para los participantes con habilidades motrices, visuales y auditivas disminuidas, es muy importante proporcionar retroalimentación visual, auditiva y háptica basada en el dispositivo de interacción y el dispositivo de despliegue que les facilite la terminación exitosa de la tarea terapéutica solicitada. La selección del dispositivo de interacción y el ajuste del dispositivo de despliegue dependen de los resultados de la calibración y el entrenamiento de los participantes previo a la ejecución de la tarea. Con lo anterior, es posible mejorar la experiencia de uso de los participantes reduciendo los niveles de emociones negativas (por ejemplo frustración, incomodidad, tristeza) y la carga de trabajo.

DG2. Retroalimentación háptica y soporte en tiempo real como motivadores. En complemento de la guía anterior, es importante proporcionar soporte físico en tiempo real para compensar las capacidades motrices disminuidas de los participantes. Este soporte físico en tiempo real puede consistir en inducir, restringir o asistir el movimiento de la mano de los participantes para delimitar el área de trabajo de la tarea.

DG3. Adaptabilidad para personalizar en tiempo real el reto en el ejercicio de acuerdo a las emociones de los participantes o el desempeño. Complementando la guía anterior, es importante adaptar en tiempo real el nivel de reto en el ejercicio generado, según las emociones o desempeño en la tarea de los participantes. De aquí que, la capacidad motriz de los participantes requiere ser considerada para mejorar la experiencia de uso y reducir la carga de trabajo de la tarea.

Estas guías de diseño preliminares intentan reducir los resultados de las diferencias significativas en el desempeño, la carga de trabajo y las emociones de los participantes para incrementar la posibilidad de adopción de la terapia y mejorar el diseño de los AVs, según: i) el dispositivo de interacción usado, ii) el tipo de retroalimentación proporcionada durante el ejercicio de terapia, y iii) el impacto de la capacidad motriz disminuida de los participantes.

5.4.1 Limitaciones

Respecto a las limitaciones, se resalta que consideramos tener tres principales: la primera limitación se debe a que se condujo sólo una sesión de terapia por participante y con ello, no es posible saber cuál de los dos dispositivos y tipos de retroalimentación generan mejores resultados en un tiempo largo (p. ej. transferencia desde entorno virtual al real); la segunda limitación se debe al tamaño de la muestra usada en el experimento, es necesario incluir a más adultos mayores y terapeutas no sólo para confirmar los aspectos observados y establecer mejor el impacto y el alcance de nuestros resultados, sino también para identificar aspectos adicionales no considerados actualmente; la tercera limitación se debe a la necesidad de evaluar las guías de diseño propuestas con expertos en HCI y HRI para identificar fortalezas adicionales y posibles debilidades.

5.5 Resumen del capítulo

En este capítulo se han presentado los resultados del desarrollo de un AV basado en el modelo de diseño presentado en el capítulo 4. El AV fue evaluado con dos grupos de

participantes (adultos sanos y adultos mayores con problemas motrices de brazo) para determinar el efecto de la retroalimentación háptica al ejecutar un ejercicio de terapia en su desempeño, carga de trabajo y emociones. Además para identificar aspectos a considerar para incrementar la adopción de la terapia y el diseño del AV. Como parte de los resultados de la evaluación realizada se obtuvo lo siguiente:

- La precisión de los participantes es significativamente mejor cuando se incorpora la retroalimentación háptica en la ejecución del ejercicio de terapia mediante el AV.
- La precisión y eficiencia en el ejercicio es significativamente diferente en el grupo de adultos sanos (G1) cuando utilizan el dispositivo Novint Falcon respecto al grupo de adultos mayores con problemas motrices de brazo (G2) cuando utilizan el dispositivo Leap Motion.
- Los participantes del G2 tuvieron una carga de trabajo mayor cuando utilizaron el dispositivo Leap Motion en la ejecución del ejercicio de terapia.
- La carga de trabajo del G2 cuando usaron el dispositivo Leap Motion fue significativamente diferente respecto a la carga de trabajo del grupo G1 cuando usaron el Leap Motion y el Novint Falcon.
- Ambos grupos de participantes consideraron que el dispositivo con retroalimentación háptica -Novint Falcon- es más efectivo, fácil de usar y fácil de aprender para conducir la tarea.
- Las emociones negativas del grupo de adultos mayores con problemas motrices de brazo (G2) son significativamente mayores cuando realizan el ejercicio sin retroalimentación háptica.
- Las emociones negativas en el grupo G1 usando cualquiera de los dos dispositivos (Leap Motion o Novint Falcon) son significativamente diferentes respecto al grupo G2 cuando utiliza el dispositivo Leap Motion.
- El análisis del comportamiento de los participantes complementa el entendimiento de las diferencias encontradas en el desempeño –precisión y eficiencia- y carga de trabajo de los participantes.
- Los resultados del desempeño, la carga de trabajo y las emociones de los participantes proporcionan evidencia de los beneficios de la retroalimentación háptica en la adopción de la terapia y el diseño del AV.

- Se proponen tres guías de diseño preliminares para los AVs.

Con los resultados de la evaluación del AV y el efecto de la retroalimentación háptica se fortalece la evidencia de integrar otras técnicas en el modelo de diseño para evaluar la adherencia y motivación de los participantes. Por lo anterior, en el siguiente capítulo se muestra la representación formal del modelo mediante una ontología que considera los hallazgos de diseño obtenidos en este capítulo.

Capítulo 6

Representación formal del modelo de diseño: ontología VEULMoR

En este capítulo se describe la representación formal del modelo de diseño explicado en el Capítulo 4, el cual fue iterado de acuerdo con los resultados de la prueba de concepto del Capítulo 5. En el presente capítulo se propone una ontología para la representación formal del modelo de diseño, evaluada con expertos del dominio -terapeutas físicos y terapeutas ocupacionales- y desarrolladores de software.

En las ciencias de la computación las ontologías son herramientas formales que permiten la descripción de objetos, propiedades y relaciones de dichos objetos en un contexto de dominio determinado [89]. De acuerdo a Studer et al.[247] una ontología es “una especificación formal y conceptualización compartida”. En donde los elementos principales de la ontología se pueden identificar como *clases*, las cuales agrupan conceptos y todas sus granularidades; *relaciones* que proporcionan asociaciones entre los conceptos; y *axiomas formales*, las cuales proporcionan reglas y restricciones a los conceptos y estructura de las relaciones [89].

El uso de una ontología para el diseño de AVs tiene las ventajas de 1) tomar el conocimiento del dominio y expresarlo en términos del dominio, 2) generar factores de diseño más fácilmente mientras se comparte el conocimiento, y 3) ajustar la semántica del conocimiento para ser integrado con otras ontologías relacionadas [248]. Además, las ontologías proporcionan otras ventajas como [249], [250]:

- Compartir un entendimiento común de una información estructurada con personas o agentes de software (desarrolladores).
- Permitir el re-uso de conocimiento en un dominio.
- Realizar de manera explícita supuestos o inferencias de un dominio.
- Separar el conocimiento del dominio del conocimiento operacional.
- Analizar el conocimiento del dominio.
- Expandir el conocimiento del dominio.

La ontología presentada en este capítulo fue evaluada con el objetivo de i) determinar el nivel de importancia de la información contenida en la ontología, ii) determinar la percepción de usabilidad y iii) mejorar la información contenida en la misma con base en los comentarios y sugerencias de los participantes. Por último, con base en las sugerencias de los expertos de dominio emergieron las características de seguridad de la ontología para el diseño de los AVs. Enseguida se explica la ontología generada y los resultados de su evaluación.

6.1 Metodología

La ontología propuesta se desarrolló utilizando METHONTOLOGY [88], una metodología para la construcción de ontologías. METHONTOLOGY es una metodología para la construcción de ontologías desde cero o reutilizando una existente. En general proporciona un conjunto de guías de cómo es que se deben realizar las actividades para el proceso de desarrollo de la ontología, los tipos de técnicas más apropiadas para cada actividad y los productos resultantes de cada actividad.

La ontología VEULMoR (*Virtual Environment Upper Limb Motor Rehabilitation*) se representó utilizando la herramienta Protégé [251] en el Lenguaje de Ontologías Web (*Ontology Web Language*). Elegimos OWL por dos razones principales: 1) OWL fue diseñado para compartir información a través del Web, lo cual significa que el grupo de investigaciones del cuidado de la salud puede usar el conocimiento para definir y compartir datos al crear reglas de acceso para las clases; y 2) OWL tiene un método de clasificación construido a partir de inferencia con el cual se da respuesta y deducción a la solicitud de acceso de datos, además de ser un lenguaje de descripción lógica (DL) en donde se pueden usar razonadores. El razonador DL clasifica las reglas de acceso de datos de las clases y se da cuenta de la solicitud de acceso a datos de entrada como miembro de la clase de reglas de acceso de datos; donde a partir de una solicitud se aprueba o deniega el acceso y se infiere la respuesta apropiada. La herramienta Protégé fue seleccionada porque facilita en un sólo paso la creación y representación de ontologías en OWL. Protégé también fue seleccionada porque incluye características que permiten la integración entre ontologías y sus aplicaciones. Para la implementación de la ontología VEULMoR un usuario experto de Protégé nos proporcionó retroalimentación de forma regular.

6.2 Ontología VEULMoR

La ontología incluye 20 clases, 25 propiedades y 48 restricciones representadas en expresiones DL para inferir conocimiento respecto a la configuración del ejercicio, el progreso de la rehabilitación, los movimientos, el dispositivo de interacción y la calibración de seguridad, entre otros (ver Figura 6.1).

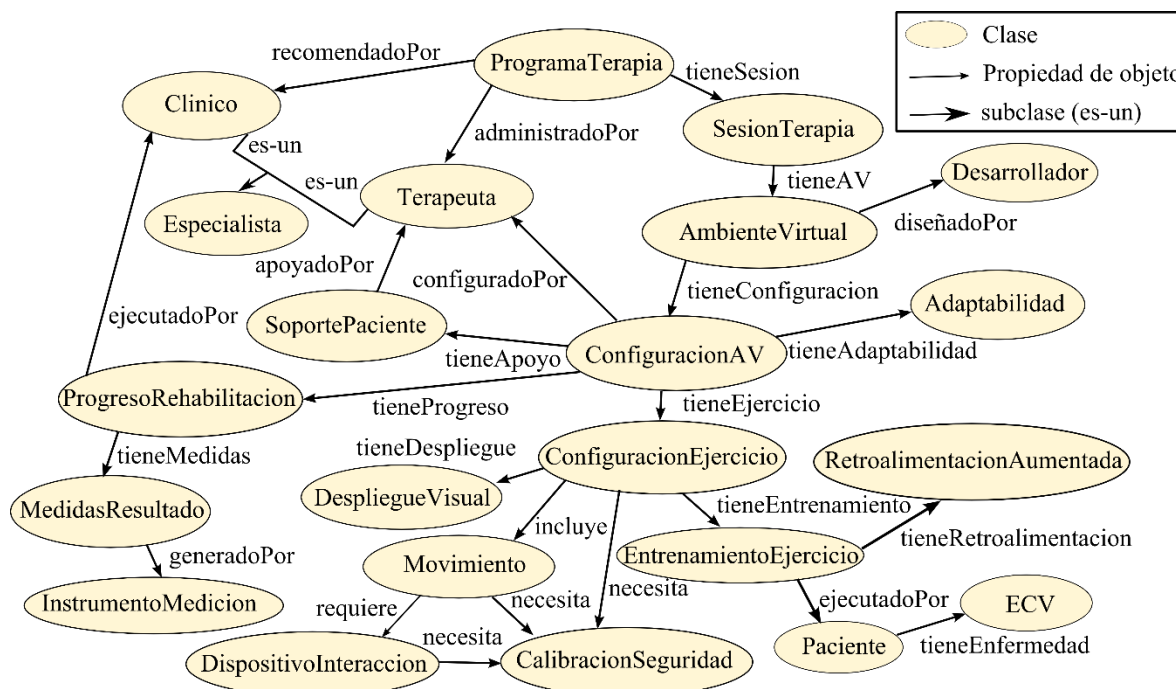


Figura 6.1. Ontología VEULMoR representada en OWL.

Las clases principales y definiciones de la ontología VEULMoR se muestran en la Tabla 6.1. Adicionalmente, la Tabla 6.2 presenta las propiedades definidas de la ontología. La Figura 6.2 muestra una captura de pantalla de la ontología para la clase ConfiguraciónAV. Por ejemplo, la clase *AmbienteVirtual* está integrada por la fecha de creación, el nombre, la descripción, la versión y el tipo de licencia del AV. La clase *ConfiguracionEjercicio* la componen la fecha de configuración, la duración, el nombre, la descripción y el tipo de ejercicio (lúdico o formal), además del nivel de reto, el tipo de incentivos y la periodicidad del entrenamiento. La fecha, la etiología, el lugar de lesión, el tamaño de lesión, el tipo de lesión, y el estado de la lesión, son algunos de los factores que integran la clase *ECV*. La clase *SoportePaciente* considera la fecha, la duración, la descripción, el tipo y el tiempo de soporte, y la estrategia de comunicación entre el paciente y el terapeuta (p. ej. síncrona o asíncrona). Mientras que la clase *CalibraciónSeguridad* incluye la fecha y la descripción de

la calibración, la definición del espacio de trabajo, la fuerza máxima, la fuerza mínima, la velocidad máxima y mínima, entre otros (para más detalles ver Figura 6.3).

Tabla 6.1. Clases principales de la ontología VEULMoR y sus definiciones.

Clase	Definición
ProgramaTerapia	Programa de terapia que recomienda el clínico y administra el terapeuta
SesionTerapia	Registro del estado actual del paciente, las funciones a rehabilitar y los resultados de cada sesión de terapia
Especialista	Clínico responsable de recomendar la terapia o terapeuta que administra la terapia
Desarrollador	Especialista en desarrollo de software responsable del diseño del AV
Paciente	Es quien recibe la rehabilitación motriz de sus extremidades superiores
ECV	Contiene las características de la enfermedad del paciente
AmbienteVirtual	Es la información general del AV
ConfiguracionAV	Es la individualización del AV con base en las características del paciente, además se establece el enfoque de terapia, el tipo del entrenamiento y el uso del AV
SoportePaciente	Es la ayuda proporcionada al paciente durante o después del ejercicio, local o remotamente, en una conversación en tiempo real o fuera de línea
Adaptabilidad	Es la modificación gradual del ejercicio de forma manual o automática con diferentes niveles de aplicación
ProgresoRehabilitacion	Es la vista del progreso del paciente con base en las medidas de salida e instrumentos seleccionados
MedidasResultado	Son las métricas del ejercicio que surgen del resultado actual o histórico, clasificadas en medidas de usabilidad, desempeño, fisiológicas o clínicas
InstrumentoMedicion	Son los instrumentos que obtienen datos de salida del paciente en términos de usabilidad, información fisiológica o clínica
ConfiguracionEjercicio	Son los parámetros que individualizan el ejercicio de terapia que ejecuta el paciente
DespliegueVisual	Determina las características del despliegue visual que tiene el ejercicio
EntrenamientoEjercicio	Es el lugar y la fecha de ejecución del ejercicio
RetroalimentacionAumentada	Es la retroalimentación aumentada visual, auditiva y/o háptica que muestra el desempeño concurrente, final o histórico del ejercicio
Movimiento	Define el movimiento de la mano -izquierda, derecha o ambas- y la parte de la mano, el nombre, el tipo y el método de movimiento que se ejecuta en el ejercicio
DispositivoInteraccion	Es el dispositivo de interacción robótico o no robótico a

	usar en el ejercicio
CalibracionSeguridad	Son los valores de ajuste acordes al paciente para garantizar su seguridad y calibración adecuada en el dispositivo de interacción, el movimiento y el ejercicio

Tabla 6.2. Propiedades principales de la ontología VEULMoR.

Propiedad de objeto	Clase dominio	Clase rango
tieneSesion	ProgramaTerapia	SesionTerapia
recomendadoPor	ProgramaTerapia	Clinico
administradoPor	ProgramaTerapia	Terapeuta
tieneAV	SesiónTerapia	AmbienteVirtual
diseñadoPor	AmbienteVirtual	Desarrollador
tieneConfiguracion	AmbienteVirtual	ConfiguracionAV
configuradoPor	ConfiguracionAV	Terapeuta
tieneSoporte	ConfiguracionAV	SoportePaciente
tieneAdaptabilidad	ConfiguracionAV	Adaptabilidad
tieneProgreso	ConfiguracionAV	ProgresoRehabilitacion
tieneEjercicio	ConfiguracionAV	ConfiguracionEjercicio
apoyadoPor	SoportePaciente	Terapeuta
tieneMedidas	ProgresoRehabilitacion	MedidasResultado
evaluadoPor	ProgresoRehabilitacion	Clinico
generadoPor	MedidasResultado	InstrumentoMedicion
tieneDespliegue	ConfiguracionEjercicio	DespliegueVisual
incluye	ConfiguracionEjercicio	Movimiento
necesita	ConfiguracionEjercicio	CalibraciónSeguridad
tieneEntrenamiento	ConfiguracionEjercicio	EntrenamientoEjercicio
requiere	Movimiento	DispositivoInteraccion
necesita	Movimiento	CalibracionSeguridad
necesita	DispositivoInteracción	CalibracionSeguridad
tieneRetroalimentacion	EntrenamientoEjercicio	RetroalimentacionAumentada
ejecutadoPor	EntrenamientoEjercicio	Paciente
tieneEnfermedad	Paciente	ECV

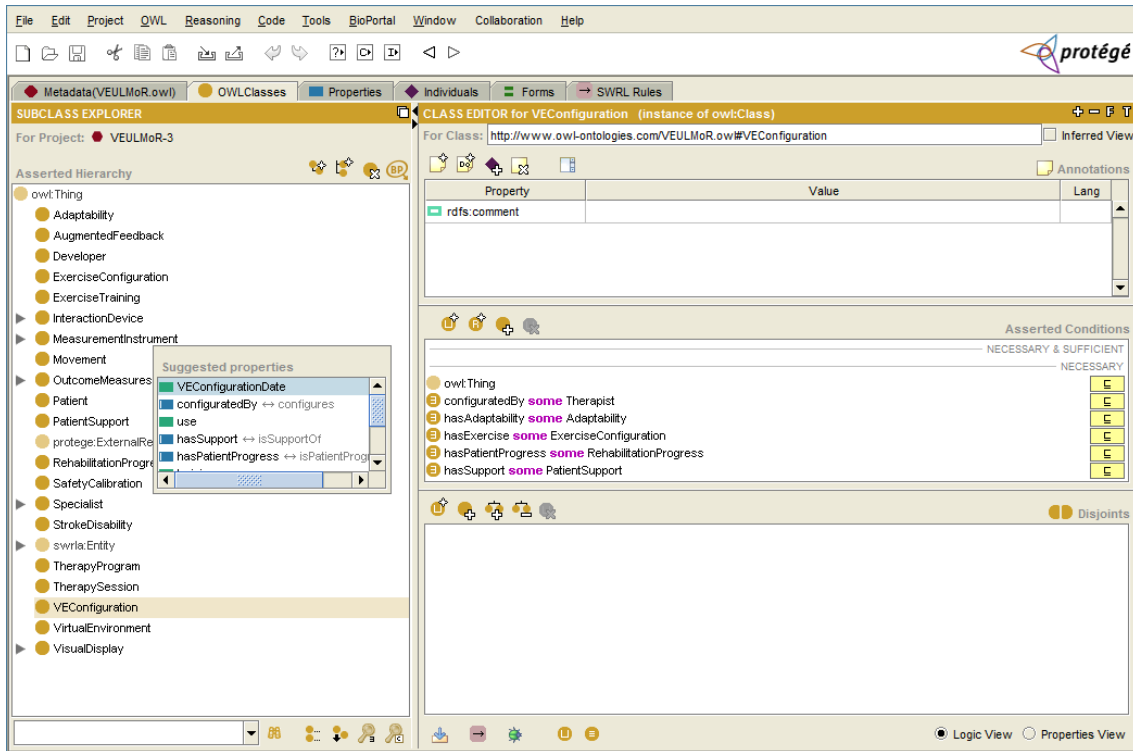


Figura 6.2. Captura de pantalla de la herramienta Protégé de la ontología para la clase ConfiguraciónAV.

La Figura 6.3 presenta la ontología representada en el Lenguaje de Modelado Unificado con base en las representación sugerida por Marian et al. [252]. En esta representación se muestran las propiedades de objeto y los tipos de datos que tienen las clases principales de la ontología.

Enseguida se explica la evaluación de la ontología VEULMoR con expertos de dominio y desarrolladores de software.

6.3 Evaluación de la ontología

Con el fin de analizar la ontología VEULMoR conducimos una evaluación con expertos de dominio y desarrolladores de software. En la evaluación los participantes determinaron i) el nivel de importancia de las clases de la ontología, ii) la percepción de utilidad, facilidad de uso, facilidad de aprendizaje e intención de uso, y iii) las sugerencias y los comentarios para la ontología propuesta.

6.3.1 Participantes

Participaron de manera voluntaria un grupo de expertos de dominio (terapeutas ocupacionales y físicos) y un grupo de desarrolladores de software. El grupo de expertos de dominio (G1), conformado por 6 terapeutas (5 terapeutas físicos y 1 terapeuta ocupacional, 4 mujeres y 2 hombres, edad media 36.5 ± 10.21) quienes trabajan en 5 instituciones diferentes (1 pública y 4 privadas) con una experiencia promedio de $14.33 \text{ años} \pm 11.35$. Los terapeutas fueron reclutados del “Instituto Mexicano de Seguridad Social (IMSS)”, “Centro de Rehabilitación CREC”, “Fisioterapia de Ensenada”, “Fistema: clínica de fisioterapia y Osteopatía” y “Rehabilita Center”. Cuatro de las instituciones de rehabilitación localizadas en Ensenada Baja California (B.C.) y una en Tijuana B.C. México. El grupo de desarrolladores de software (G2), conformado por 6 desarrolladores (6 hombres, edad media 35 ± 10.16) quienes laboran en tres ciudades diferentes de México (3 Sonora, 2 Guadalajara y 1 Distrito Federal) con una experiencia promedio de $12 \text{ años} \pm 11.45$. Ninguno de los desarrolladores de software declaró tener experiencia en el diseño de aplicaciones para rehabilitación motriz, siendo su principal experiencia el desarrollo de aplicaciones Web y móviles.

6.3.2 Diseño experimental y procedimiento

El experimento siguió el paradigma de diseño *between subjects*, esto es, ambos grupos realizaron la tarea siguiendo la condición:

C1. Evaluación de la ontología usando dos cuestionarios Web semi-estructurados (ver Figura 6.4).

A los participantes de ambos grupos se les explicó la ontología en una sesión de 30 minutos. Después de manera individual los participantes de ambos grupos utilizaron dos cuestionarios Web semi-estructurados para proporcionar su percepción de la ontología. En el primer cuestionario los participantes asignaron un nivel de importancia para cada clase usando una escala Likert 5 (esto es, nada importante, poco importante, medianamente importante, importante, altamente importante) (ver Figura 6.4). Además, los participantes agregaron una explicación para cada clase indicando el por qué determinaron tal nivel de importancia. Por último, los participantes explicaron si era necesario agregar y/o modificar alguno de los componentes -atributos o factores- de cada clase. En el segundo cuestionario los participantes asignaron su percepción de utilidad, facilidad de uso, facilidad de aprendizaje e intención de uso de la ontología usando el cuestionario TAM [253] con una escala Likert 5 (p. ej. para facilidad de uso: nada, poco, medianamente, fácil de usar, muy fácil de usar) (ver Figura 6.4). Las hipótesis formuladas fueron las siguientes:

H1. El nivel de importancia de las clases de la ontología percibido por los expertos de dominio (G1) es mayor respecto al nivel de importancia asignado por los desarrolladores de software (G2).

H2. Los expertos de dominio (G1) y los desarrolladores de software (G2) tienen la misma percepción de utilidad, facilidad de uso, facilidad de aprendizaje e intención de uso de la ontología.

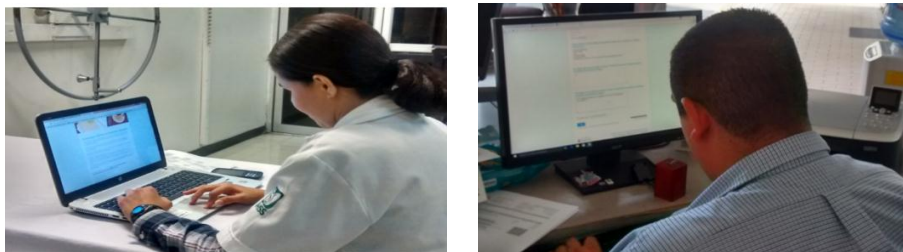


Figura 6.4. Participantes conduciendo la evaluación usando dos cuestionarios Web semi-estructurados: experto de dominio (izquierda) y desarrollador de software (derecha).

6.3.3 Análisis estadístico

El software Arena fue utilizado para analizar los datos [244]. Un análisis primario de normalidad (herramienta Input Analyzer) indicó que las variables de salida no estaban normalmente distribuidas. Por lo anterior, se aplicó un análisis estadístico no paramétrico. La prueba no paramétrica de una cola Mann-Whitney U [245] fue usada para analizar el

nivel de importancia de las clases (hipótesis H1). Por último, la prueba no paramétrica de dos colas Mann-Whitney U [245] fue usada para analizar la percepción de usabilidad de la ontología (hipótesis H2).

6.4 Resultados de la evaluación

La ontología fue evaluada en términos del nivel de importancia de las clases de la ontología y la percepción de usabilidad -utilidad, facilidad de uso, facilidad de aprendizaje e intención de uso. En la Tabla 6.3 se presenta el resumen de resultados obtenidos en ambos grupos, G1 (grupo de expertos de dominio) y G2 (grupo de desarrolladores de software).

Tabla 6.3. Resultados de la evaluación en términos del nivel de importancia de las clases de la ontología (H1) y la usabilidad percibida (H2) (5-puntos escala Likert). G1: grupo de expertos de dominio, G2: grupo de desarrolladores de software. M: Mediana, IQR(número): Rango Intercuartil (primero o tercero).

Hipótesis	Resultado			
	H1 (nivel de importancia)		H2 (usabilidad)	
Grupo	G1	G2	G1	G2
M	4.71	3.78	4.46	4.33
IQR1	4.58	3.42	4.25	3.50
IQR3	4.84	4.00	4.50	5.00

Los resultados se analizaron en términos del nivel de importancia asignado por ambos grupos a cada clase de la ontología (ver Tabla 6.4). Como se observa en la Tabla 6.4, las diferencias son significativas en el nivel de importancia de las clases de la ontología asignado por ambos grupos. De acuerdo al estadístico de prueba, se encontró que el grupo de expertos de dominio (G1) proporciona un nivel de importancia mayor a las clases de la ontología. Estos resultados sugieren un alto nivel de importancia y validez de la información de dominio de rehabilitación motriz de extremidades superiores para el diseño de los AVs.

Tabla 6.4. Resumen de la prueba Mann-Whitney U en la hipótesis H1 (valor crítico $U_{\alpha(1),6,6}=33$) e hipótesis H2 (valor crítico $U_{\alpha(2),6,6}=34$). G1: grupo de expertos de dominio, G2: grupo de desarrolladores de software.

Comparativa	Valor estadístico	Significado de la diferencia
H1 (nivel de importancia, $\alpha=0.01$)		
G1 vs G2	36	Significante
H2 (usabilidad, $\alpha=0.01$)		
G1 vs G2	14	No significativa

Adicionalmente, se analizó a detalle el nivel de importancia asignado a cada clase. La Figura 6.5 muestra el promedio del nivel de importancia de cada clase establecido por ambos grupos. Como se observa en la Figura 6.5 el grupo de expertos de dominio (G1) asignó un nivel de *importante* o *altamente importante*, mientras que el grupo de desarrolladores de software (G2) asignó un nivel de *medianamente importante* o *importante*. Cabe resaltar que las clases clasificadas como *altamente importantes* por los expertos de dominio (G1) fueron de las mejor percibidas por el grupo de desarrolladores de software (G2) (ver Figura 6.5). Finalmente, ambos grupos consideraron que la clase *DespliegueVisual* es la menos importante en el diseño del AV clasificándola como *medianamente importante* en el grupo G1 (3.33/5) e *importante* en el grupo G2 (4.16/5).

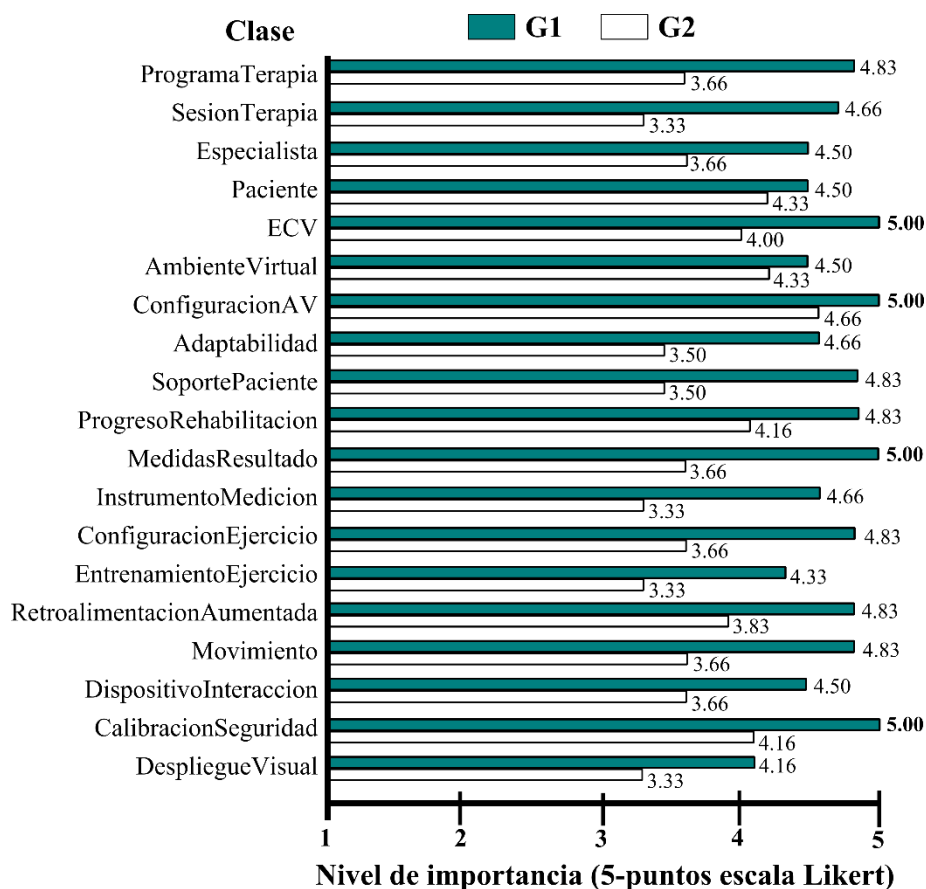


Figura 6.5. Vista del nivel de importancia promedio de las clases de la ontología asignado por el grupo de los expertos de dominio (G1) y el grupo de los desarrolladores de software (G2) (5-puntos escala Likert).

En la Figura 6.6 se observa que el grupo de los expertos de dominio (G1) considera *altamente importantes* las clases *ECV*, *ConfiguracionAV*, *MedidasResultado*, y *CalibracionSeguridad* y el resto de las clases las consideran *importantes*. Por otro lado, la Figura 6.7 muestra que las clases consideradas como *importantes* para los participantes del grupo G2 son *Paciente*, *ECV*, *AmbienteVirtual*, *ConfiguracionAV*, *ProgresoRehabilitacion* y *CalibracionSeguridad*, mientras que el resto de las clases las consideran *medianamente importantes*.

Por otro lado, en la Tabla 6.4 se muestra que no existe diferencia significativa en la percepción de utilidad, facilidad de uso, facilidad de aprendizaje e intención de uso de la ontología para ambos grupos. Lo anterior se muestra en la Figura 6.8, en donde se presenta el promedio de ambos grupos para la percepción de utilidad, facilidad de uso, facilidad de aprendizaje e intención de uso de la ontología. Aunque en el estadístico de prueba se confirma que las diferencias no son significativas, la Figura 6.8 enseña que la percepción de *facilidad de uso* fue ligeramente mayor en el grupo de desarrolladores de software (G2). Además, en la percepción de *facilidad de aprendizaje* fue más sencillo para los expertos de dominio (G1) entender la información de dominio. Por último, los resultados sugieren que los expertos de dominio (G1) están completamente convencidos de utilizar la ontología como un instrumento que representa la información del dominio de rehabilitación motriz de extremidades superiores para el diseño de los AVs.

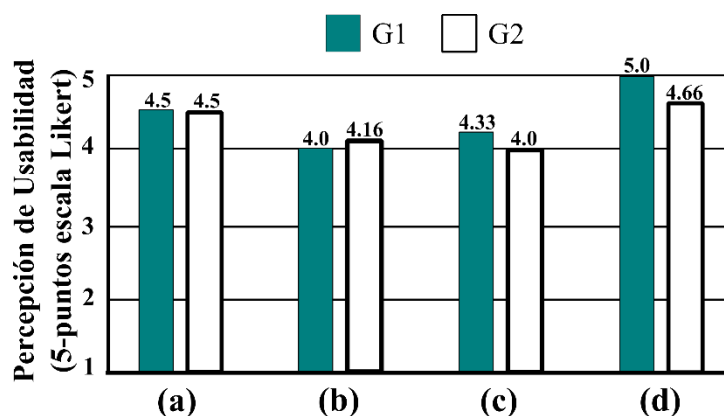


Figura 6.8. Percepción promedio de: a) utilidad, b) facilidad de uso, c) facilidad de aprendizaje, y d) intención de uso de la ontología (5-puntos escala Likert). G1: grupo de expertos de dominio, G2: grupo de desarrolladores de software.

En las recomendaciones proporcionadas por los participantes, el grupo de especialistas de dominio (G1) recomendó agregar en la clase *Movimiento* un factor que les indique el tipo de movimiento que realiza el paciente (esto es, activo, pasivo, pasivo-asistido). También recomendó agregar un factor en la clase *Movimiento* que indique el método de movimiento, (global o analítico). Además, resaltaron que las medidas de la clase *MedidasResultado* tienen que basarse en escalas válidas (p. ej. Brunnstrom que sirve para medir la espasticidad y sinergia motora). Además, consideraron importante incluir si el paciente practica algún deporte, su estado de ánimo o si tiene limitaciones agregadas. En la enfermedad del

paciente (clase *ECV*) recomendaron determinar a detalle su escala de espasticidad. Por último, en la clase *SoportePaciente* recomendaron involucrar también al familiar o al cuidador porque en el hogar ellos son los que acompañan al paciente (ver Tabla 6.5).

Tabla 6.5. Recomendaciones de los expertos de dominio que indican agregar nuevos atributos a las clases mencionadas y una nueva clase llamada Cuidador (G1).

Clase	Recomendación	Nombre del componente agregado (tipo)
ProgramaTerapia	<i>“el lapso de tiempo y tiempo de cada sesión”</i> (P1)	descripcionTratamiento (datatype), periodicidadSesion (datatype)
Paciente	<i>“si ha practicado algún deporte por algún tiempo”</i> (P3), <i>“estado de ánimo del paciente”</i> (P4), <i>“agregar las limitaciones agregadas, p. ej. ceguera, hipoacusia, deformidades articulares, porque pueden entorpecer el cumplimiento de objetivos”</i> (P5)	practicaDeportes (atributo), otrasEnfermedades (datatype)
ECV	<i>“escala de espasticidad”</i> (P2)	nivelEnfermedad (datatype)
SoportePaciente	<i>“involucrar al familiar ya que el clínico y terapeuta somos guías del proceso”</i> (P2), <i>“agregar al familiar ya que ellos son los que se la pasan con el paciente”</i> (P3)	Cuidador (clase)
Movimiento	<i>“si la parte del movimiento es analítico o global”</i> (P3), <i>“si un elemento que marque la forma de movilización si es analítica o global”</i> (P4)	tipoMovimiento (datatype), metodoMovimiento (datatype)
CalibracionSeguridad	<i>“algún botón que detenga todo”</i> (P2), <i>“los ángulos de movimiento”</i> (P3)	descripcionCalibracion (datatype)
MedidasResultado	<i>“añadir una descripción con una escala válida (p. ej. Brunnstrom) que sirve para medir espasticidad y sinergia motora”</i> (P1)	descripcionMedida (datatype)

Por otro lado, los participantes del grupo de desarrolladores de software (G2) sugirieron agregar en la clase *SesionTerapia* el tiempo que dura la sesión. Para la clase *Especialista* comentaron incluir el tiempo de atención. Además, en la clase *Paciente* los participantes

sugirieron agregar un número de emergencia para contactar a familiares del paciente y la dirección del paciente. Finalmente, los participantes del grupo G2 sugirieron agregar en la clase *AmbienteVirtual* su finalidad u objetivo (ver Tabla 6.6).

Tabla 6.6. Recomendaciones de los desarrolladores de software que indican agregar nuevos atributos a las clases mencionadas (G2).

Clase	Recomendación	Nombre del componente agregado (tipo)
SesionTerapia	<i>“tiempo de la sesión”</i> (P3)	duracionSesion (<i>datatype</i>)
Especialista	<i>“horario de atención”</i> (P3,P4)	horario (<i>datatype</i>)
Paciente	<i>“teléfono de emergencia”</i> (P2,P6), <i>“dirección”</i> (P3)	numeroEmergencia (<i>datatype</i>), dirección (<i>datatype</i>)
AmbienteVirtual	<i>“finalidad”</i> (P2), <i>“objetivo”</i> (P3,P5)	objetivo (<i>datatype</i>)

Con base en las sugerencias y recomendaciones para el contenido proporcionadas por ambos grupos, la ontología VEULMoR modificada se presenta en la Figura 6.9. Las modificaciones de contenido de las clases se resaltan en negritas. Además, con base en las sugerencias de los especialistas de dominio (G1) en la Figura 6.9 se agrega la clase *Cuidador* que representa al familiar o el cuidador que apoya al paciente en la ejecución de sus ejercicios en casa.

Enseguida en la Tabla 6.7 se describen los atributos de las clases de la ontología -sus tipos de dato (*datatype*)- de acuerdo a la ontología presentada en la Figura 6.9.

Tabla 6.7. Atributos de las clases de la ontología VEULMoR.

Clase (subclase)	Datatype	Descripción
ProgramaTerapia	fechaPrograma	Fecha de elaboración del programa de terapia
	fechaDiagnostico	Fecha de diagnóstico del clínico
	diagnosticoClinico	Diagnóstico del paciente asignado por el clínico
	diagnosticoTerapeuta	Diagnóstico del paciente asignado por el terapeuta
	descripcionTratamiento	Descripción del tratamiento asignado por el terapeuta
	fechaInicioTratamiento	Fecha inicial del tratamiento
	fechaFinalTratamiento	Fecha final del tratamiento
	numeroSesiones	Número de sesiones programadas en el tratamiento
	periodicidadSesiones	Periodicidad de las sesiones programadas en el tratamiento
SesionTerapia	fechaSesion	Fecha de realización de la sesión
	horarioSesion	Horario de realización de la sesión
	duracionSesion	Duración de la sesión
	observacionInicial	Observaciones del terapeuta respecto al estado del paciente previo a la ejecución de los ejercicios
	observacionFinal	Observaciones del terapeuta según el estado final del paciente después de la ejecución de los ejercicios
	funcion	Función a mejorar, recuperar o mantener en el paciente, p. ej. fuerza muscular, rango de movimiento, sensibilidad, y coordinación vista-mano, entre otras
AmbienteVirtual	fechaCreacion	Fecha de creación del AV
	nombreAV	Nombre asignado al AV
	descripcion	Descripción del AV
	objetivo	Objetivo o propósito del AV
	version	Versión del AV
	licencia	Tipo de licencia del AV
Desarrollador	nombre	Nombre del desarrollador
	apellido	Apellido del desarrollador
	género	Género del desarrollador

Especialista	nombre	Nombre del especialista que recomienda o administra la terapia
	apellido	Apellido del especialista
	genero	Género del especialista
	horario	Horario de atención del especialista
Especialista (Clinico)	id	Número de identificación del clínico
Especialista (Terapeuta)	departamento	Área de adscripción del terapeuta, p. ej. ocupacional, física
Cuidador	nombre	Nombre del cuidador que apoya al paciente
	apellido	Apellido del cuidador que apoya al paciente
	genero	Género del cuidador que apoya al paciente
ConfiguraciónAV	fechaConfiguracionAV	Fecha de configuración del AV
	enfoque	Estrategia a usar en la terapia, p. ej. tarea específica, contexto específico, inducido a restricciones, terapia de espejo, estimulación eléctrica o <i>biofeedback</i>
	entrenamiento	Tipo de entrenamiento, p. ej. una mano (unilateral) o dos manos (bilateral)
	uso	Uso del AV, p. ej. clínica, centro de rehabilitación u hogar del paciente
SoportePaciente	fechaApoyo	Fecha del apoyo o soporte proporcionado al paciente
	duracionApoyo	Duración del soporte
	descripcionApoyo	Descripción del soporte
	tiempoApoyo	Forma del soporte proporcionado, p. ej. durante el ejercicio (<i>online</i>) o antes-después del ejercicio (<i>offline</i>)
	tipoApoyo	Tipo de soporte proporcionado, p. ej. de forma local o de forma remota
	tipoComunicacion	Tipo de comunicación con el paciente, p. ej. en tiempo real (chat, video) o no (notas del terapeuta, correo electrónico)
Adaptabilidad	mecanismo	Forma de proporcionar la adaptabilidad del ejercicio, p. ej. manual al configurar la terapia, automática mediante algún algoritmo en tiempo real según el desempeño del paciente o mediante

		el dispositivo de interacción (al restringir o apoyar el movimiento del paciente)
	alcance	Alcance de la adaptabilidad, p. ej. entre cada ejercicio, durante la sesión actual de terapia o entre las diferentes sesiones de terapia
	nivel	Nivel de adaptabilidad, p. ej. en la configuración del ejercicio o en la práctica del ejercicio
ProgresoRehabilitacion	fechaProgreso	Fecha de registro del progreso del paciente
	descripcionProgreso	Descripción del progreso del paciente
	accesibilidadProgreso	Forma de acceder al progreso del paciente
	alcanceProgreso	Alcance del progreso, p. ej. conocimiento de resultados del ejercicio o sesión actual o resumen histórico de las diferentes medidas incluidas en el AV
	usuarioProgreso	Vista creada por usuario, p. ej. terapeuta, paciente, clínico
ConfiguracionEjercicio	fechaConfiguracion	Fecha de configuración del ejercicio
	duracionEjercicio	Duración del ejercicio
	nombreEjercicio	Nombre del ejercicio
	tipoEjercicio	Tipo de ejercicio, p. ej. lúdico (basado en juegos) o formal (simulación de una actividad de la vida diaria)
	descripcionEjercicio	Descripción del propósito del ejercicio
	nivelReto	Nivel de reto asignado al paciente
	incentivos	Generación de incentivos de acuerdo al desempeño del paciente, p. ej. en tiempo real (concurrente) o al final del ejercicio
	periodicidadEntrenamiento	Calendarización de la ejecución del ejercicio
Movimiento	brazo	Brazo a rehabilitar, p. ej. izquierdo o derecho
	tipoMovimiento	Tipo de movimiento realizado por el paciente, p. ej. activo (el paciente puede mover su brazo por sí sólo), pasivo (es necesario ejercer una

		fuerza externa para ayudar a mover el brazo del paciente) o pasivo-asistido (si el paciente puede mover su mano pero requiere ayuda)
	metodoMovimiento	Si el movimiento es por articulación (analítico) o incluye varias articulaciones (global)
	nombreMovimiento	Movimiento de las articulaciones, p. ej. aducción-aducción, flexión-extensión, pronación-supinación, rotación interna-externa
	parteBrazo	Parte del brazo a rehabilitar, p. ej. dedos, mano, muñeca, antebrazo, codo u hombro
DispositivoInteraccion (DispositivoNoRobotico, DispositivoRobotico)	nombreDispositivo	Nombre del dispositivo de interacción
	descripcionDispositivo	Descripción del dispositivo de interacción
DispositivoInteraccion (DispositivoRobotico)	inercia	Este atributo depende de la masa del dispositivo háptico. El objetivo es mejorar la transparencia del dispositivo por la disminución de la inercia que siente el usuario en una libre circulación, sin restricciones en el movimiento [68]
	friccionAmortiguacion	La fricción cinética se presenta de dos formas: la fricción de Coulomb y la fricción viscosa o de amortiguación. Ambas formas se consideran como las fuerzas de resistencia que se opone al movimiento [68]
	rigidez	Es la capacidad de un dispositivo para imitar una pared virtual o un objeto [68]
	tamaño	El tamaño de un dispositivo háptico tiene un impacto directo sobre el nivel de confort del usuario [68]
	peso	El peso de un dispositivo háptico tiene un impacto directo sobre el nivel de confort del usuario [68]
	backdrivability	Esto se refiere a la capacidad de mover el efector final del dispositivo dentro del espacio de trabajo sin oposición/resistencia [68]

espacioTrabajo	El área o volumen en el espacio del mundo real que el efector final de un dispositivo háptico puede alcanzar. El espacio de trabajo háptico se clasifica como de traslación o de rotación [68]
resolucionPosicion	Es la cantidad más pequeña de movimiento sobre el cual los sensores de posición pueden detectar un cambio en la posición del punto del dispositivo de efector final. Esencialmente, la resolución de la posición depende de la resolución de la posición del usuario [68]
gradoLibertad	Se utiliza para describir las capacidades de movimiento, sensado y actuación del dispositivo háptico [68]
precision	Se refiere a cómo el sensor de posición puede referirse a su posición [68]
repetibilidad	Representa la precisión con la que el dispositivo háptico puede detectar la posición física idéntica como la misma posición virtual [68]
ubicacionConexionTierra	Es la base de referencia con la que el dispositivo se conecta, p .ej. con base en tierra, en cuerpo o sin base [68]
latencia	Es el tiempo medido desde el instante de enviar un comando para el dispositivo al instante de recibir respuesta desde el dispositivo [68]
anchoBanda	Se define como el rango de frecuencias en el que el controlador de mano proporciona la fuerza de respuesta. En teoría, el ancho de banda deseado depende del sistema de la percepción humana, pero en la práctica depende de la operación realizada [68]
frecuenciaActualizacionHa ptica	Esta tasa es la velocidad a la que se puede completar el ciclo de retroalimentación y por lo general

		se expresa en Hertz. Esto incluye la ejecución continua de los algoritmos de representación hápticos de muestreo de los sensores de posición a la aplicación de fuerzas de reacción correspondientes en el operador a través del dispositivo háptico. 1 kHz es un valor común, aunque no existen reglas fijas para la frecuencia de actualización háptica [68]
	aceleracionMaxima	Este atributo refleja la capacidad de un dispositivo háptico para simular la rigidez de objetos virtuales tales como paredes [68]
	latenciaSistema	Es el tiempo de retardo total del sistema de realidad virtual háptico. Esto incluye la detección de la posición del dispositivo háptico, el cálculo de la fuerza de respuesta en la simulación, el envío de la fuerza al dispositivo y la lectura de la siguiente posición [68]
DispositivoInteraccion (DispositivoNoRobotico)	tipo	Es el tipo de dispositivo no robótico a usar, p. ej. sensor, cámara, y guante, entre otros
CalibracionSeguridad	fechaCalibracion	Fecha de calibración
	descripcionCalibracion	Descripción de la calibración
	espacioTrabajoCalibracion	Espacio de trabajo en los ejes x, y o z en el AV
	fuerzaMaxCalibracion	Fuerza máxima necesaria para mover los objetos en el AV
	fuerzaMinCalibracion	Fuerza mínima necesaria para mover los objetos en el AV
	velocidadMaxCalibracion	Velocidad máxima de los objetos a mostrar en el AV
	velocidadMinCalibracion	Velocidad mínima de los objetos a mostrar en el AV
	ROMMaxCalibracion	Máximo rango de movimiento de los objetos a mostrar en el AV
	ROMMinCalibracion	Mínimo rango de movimiento de los objetos a mostrar en el AV
DespliegueVisual (DespliegueInmersivo, DespliegueNoInmersivo)	nombreDespliegue	Nombre del dispositivo de despliegue
	descripcionDespliegue	Descripción del dispositivo de

		despliegue
DespliegueVisual (DespliegueInmersivo)	tipoInmersivo	Tipo de dispositivo de despliegue que incrementa la inmersión en el AV, p. ej. pantallas montadas en la cabeza (HMD, por sus siglas en inglés), CAVE (<i>Cave Automatic Virtual Environment</i>) o lentes
DespliegueVisual (DespliegueNoInmersivo)	tipoNoInmersivo	Tipo de dispositivo de despliegue no inmersivo, p. ej. monitores táctiles o no, televisión, proyector, celular o tableta
EntrenamientoEjercicio	fechaEntrenamiento	Fecha de la ejecución o práctica del ejercicio
	lugarEntrenamiento	Lugar de la ejecución o práctica del ejercicio
RetroalimentacionAumentada	tiempoRetroalimentacion	Tiempo en el que se proporciona la retroalimentación, durante o al final de la ejecución del ejercicio
	tipoRetroalimentación	Tipo de retroalimentación a proporcionar al paciente y especialistas
	frecuencia	Intervalo de tiempo en el que se genera la retroalimentación
	velocidad	Velocidad promedio, mayor o menor generada en la práctica del ejercicio
	trayectoria	Trayectoria del ejercicio
	taresLogradas	Tareas exitosas logradas
	errores	Número de errores detectados en el ejercicio
	fuerzaMinima	Fuerza mínima ejercida por el paciente en el ejercicio
	fuerzaMaxima	Fuerza máxima ejercida por el paciente en el ejercicio
	tiempoTerminacionEjercicio	Tiempo total para completar el ejercicio
Paciente	nombre	Nombre del paciente
	apellido	Apellido del paciente
	genero	Género del paciente
	raza	Raza del paciente
	etnia	Etnia del paciente
	fechaNacimiento	Fecha de nacimiento del paciente
	dirección	Dirección del paciente
	practicaDeportes	Deportes que practica el paciente
	numeroEmergencia	Número de emergencia del paciente

ECV	nivelSociocultural	Nivel socio cultural del paciente
	localizacionGeografica	Localización geográfica del paciente
	factoresHereditarios	Factores hereditarios del paciente
	otrasEnfermedades	Otras enfermedades del paciente
	fechaLesion	Fecha del accidente cerebrovascular
	etiologia	Causa del accidente cerebrovascular
	lugarSesion	Lugar de la lesión del paciente
	tamañoLesion	Tamaño de la lesión
	tipoLesion	Tipo de lesión, p. ej. hemorrágica o isquémica
	estadoLesion	Estado de la lesión de acuerdo al tiempo transcurrido después de la lesión cerebrovascular, p. ej. aguda (0 a 1 mes), sub aguda (3-6 meses) o crónica (6 meses o más)
	nivelEnfermedad	Descripción general de la afectación en el paciente
	impedimentoFuncionEstructura	Descripción del deterioro a nivel funcionalidad y estructura del paciente.
	limitacionActividad	Descripción de las limitaciones en las actividades del paciente
	restriccionParticipacion	Descripción de las restricciones de participación en la vida diaria
	factoresEntorno	Descripción del entorno físico, social y actitudinal en el que viven y conducen sus vidas las personas rodean al paciente
	factoresPersonales	Factores personales del paciente, tales como condiciones de salud, estilo de vida, hábitos, educación, el origen social, la profesión, la experiencia pasada y actual, el patrón general de comportamiento y estilo de carácter, entre otros
MedidasResultado	descripcionMedida	Descripción de la métrica usada para controlar el progreso del paciente
MedidaResultado (MedicionFisiologica)	tipoFisiologica	Es la métrica que permite obtener p. ej. la presión sanguínea, latidos del corazón, variabilidad de los latidos del corazón, tamaño de las pupilas, tono de voz, emociones (a

		través del análisis gestual o de comportamiento), frecuencia y duración del cierre ocular, fatiga, sudoración, frecuencia respiración, carga de trabajo, activación muscular o cerebral, entre otros
MedidaResultado (MedicionUsabilidad)	tipoUsabilidad	Contiene métricas para obtener la percepción de usabilidad de los usuarios del AV, p. ej. facilidad de uso, eficiencia, efectividad, manejo de errores, facilidad de aprendizaje, seguridad de uso, utilidad, entre otros
MedidaResultado (MedicionClinica)	tipoClínica	Incluye métricas que permiten mostrar las afectaciones a nivel funcional o estructura, actividad o participación de los pacientes
InstrumentoMedicion	descripcionInstrumento	Instrumento usado para obtener las métricas
InstrumentoMedicion (ReporteFisiologico)	reporteFisiologico	Reporte para obtener las emociones (p. ej. estrés), la personalidad o la carga de trabajo. Para ello se utilizan instrumentos como p. ej. DSSQ (<i>Dunde Stress State Questionnaire</i>) [254], NASA-TLX [241], NEO-PI-R (<i>Personality Inventory</i>) [255], MCH (<i>Modified Cooper-Harper</i>) [256], PANAS (<i>Positive and Negative affect</i>) [257], SCL-90 (<i>Symptom Checklist-90</i>) [258], SWAT (<i>Subjective Workload Assessment Technique</i>) [259], entre otros
InstrumentoMedicion (ReporteUsabilidad)	reporteUsabilidad	Reporte para determinar problemas en el AV, el grado de aceptación o la percepción del AV, p. ej. heurísticas de Nielsen [260], TAM (<i>Technology Acceptance Model</i>) [253], SUS (<i>System Usability Scale</i>) [261], entre otros
InstrumentoMedicion (InstrumentoFisiologico)	instrumentoFisiologico	Instrumento para obtener el movimiento de los ojos, el corazón o señales del cerebro, p. ej. sistemas de reconocimiento de ojos, electromiografía, electrocardiogramas,

		electroencefalogramas, entre otros
InstrumentoMedicion (InstrumentoClinico)	instrumentoClinico	Herramienta para medir el nivel de afectación a nivel estructura o función, actividad o participación de los pacientes, p. ej. dinamómetro, goniómetro, medidor de presión o pruebas clínicas diversas

Además, con base en los comentarios y sugerencias expresadas por los expertos de dominio (G1) emergieron temas para las *características de seguridad* de la ontología a considerar en el diseño de los AVs. A continuación se listan estos temas.

- **Ajuste de las estrategias de terapia.** Este tema emergió de las sugerencias dado que los participantes consideran que con el paso del tiempo es necesario modificar las estrategias de terapia de acuerdo al progreso que haya tenido el paciente. Algunos de los comentarios son: *“cada terapia a llevar en cada paciente debe ser adaptable dependiendo de la necesidad que presente la persona”* (P1), *“para el establecimiento de metas, cual se ha logrado y que sigue, para el método de trabajo y ritmo del mismo hay que ajustar la terapia”* (P3).
- **Selección y delimitación de los movimientos y su orden.** En este tema los participantes indicaron que es importante llevar una secuencia organizada de los movimientos que se van a realizar en la terapia. Ellos expresaron que regularmente se inicia con movimientos lo más alejados de la cabeza, siempre con movimientos para ampliar los arcos de movimiento. Además, indicaron que estos movimientos se acotan según las características de los pacientes y el orden asignado para su ejecución. Algunos comentarios expresados por los participantes son: *“es súper importante no lastimar o causar lesiones en nuestros pacientes”* (P1), *“en cuanto al movimiento se deben considerar siempre los ángulos del mismo, la fuerza mínima requerida para lograrlo y no causar una lesión al paciente tal como: fractura, desgarre, dislocación, etc.”* (P3), *“delimitar el área o espacio de trabajo nos permite mejorar el movimiento en cuanto a la precisión o fineza del mismo”* (P3), *“para evitar lesionar al paciente durante la ejecución del ejercicio; mantener cierto rango de movimiento y la cantidad de fuerza empleada, etc.”* (P4), *“es importante determinar la o las articulaciones a movilizar”* (P2), *“define como se debe trabajar, el orden en que se debe trabajar y lo que se va a trabajar [...] considerar que en un principio el movimiento es analítico (articulación por articulación) y posteriormente se deben trabajar movimientos globales (2 o más articulaciones a la vez)”* (P6).
- **Selección y calibración adecuada del dispositivo de interacción.** Los participantes reportaron que es muy importante utilizar en los ejercicios dispositivos de interacción

acordes al tipo de movimiento y las condiciones de los pacientes. Algunos de sus comentarios son: *“es importante determinar con base en sus capacidades con que dispositivo de interacción se usará”* (P2), *“según sean las condiciones del paciente (es capaz de sostener algún dispositivo), el objetivo o actividad a realizar”* (P3), *“porque será de alguna manera su herramienta de trabajo”* (P4), *“creo que estos elementos dependen de factores como edad y grado de lesión, por lo tanto tomarlos en cuenta optimizaría recursos”* (P5).

- **Selección adecuada de los instrumentos de medición.** Este tema emergió por que los participantes expresaron que los instrumentos les ayudarán a la toma de decisiones para el seguimiento puntual del progreso de los pacientes. Además, con la información de los instrumentos de medición se incrementa la efectividad del programa de terapia de manera segura. Algunos de los comentarios proporcionados son: *“es necesario usar los instrumentos adecuados de medición para conocer el estado del paciente”* (P2), *“estos instrumentos complementan la efectividad del programa de manera segura”* (P5).
- **Modificación gradual de la dificultad del ejercicio.** Los participantes comentaron que la configuración del ejercicio les permitirá cambiar los parámetros de inicio del ejercicio para salvaguardar al paciente. Algunos comentarios son: *“ir aumentando el nivel del ejercicio en función de la respuesta del paciente ante un determinado ejercicio”* (P4), *“la evaluación del progreso determinará cuando subir la complejidad del ejercicio o donde debemos dar mayor énfasis”* (P6).
- **Adaptabilidad y variabilidad del ejercicio de terapia.** En este tema los participantes resaltaron que el nivel de ajuste de los ejercicios de la terapia depende del progreso y estrategias a adoptar en el paciente. Aunque en la terapia tradicional estos ajustes son manuales, la oportunidad de realizarlos automáticamente con los ejercicios del AV permite ajustar y variar el entrenamiento de los pacientes. Algunos comentarios son: *“se debe tomar en cuenta la capacidad motriz del paciente en ese momento, la cual irá cambiando conforme al progreso del mismo, por ende se tendrá que modificar el trabajo (ejercicios) según el avance”* (P3), *“se debe adaptar el medio al paciente y no el paciente al ambiente”* (P4).

- **Retroalimentación acorde a las capacidades del paciente.** Este tema surge al expresar los participantes que mediante el uso de la tecnología (p. ej. sistemas virtuales) se generan estímulos varios (esto es, visuales, auditivos, hápticos) que incrementan la efectividad de ejecución del ejercicio. Algunos de los comentarios son: *“se ha demostrado que los sistemas o juegos virtuales generan grandes cambios en el individuo, mejorando su condición de forma integral ya que éste puede proporcionar estímulos visuales, auditivos, táctil”* (P4), *“de esta manera el paciente y el terapeuta podrán conocer de una manera objetiva la evolución”* (P6).
- **Soporte en tiempo real para el entrenamiento del ejercicio.** Los participantes indicaron la necesidad de ayudar al paciente en la ejecución de sus ejercicios. Por medio de esta ayuda, se guía y garantiza la correcta ejecución de los mismos y se evita alguna lesión no deseada. Además, al guiar el ejercicio se acompaña al paciente. Esta ayuda la puede realizar un familiar en la casa del paciente. Algunos comentarios son: *“para una mejor interacción entre ejercicio-paciente-terapeuta es necesario ayudar en la ejecución”* (P1), *“es importante ayudarlos con cualquier dificultad que se pueda presentar”* (P2), *“en ocasiones el paciente suele olvidar, confundirse o no comprender las instrucciones, así que siempre requiere de una guía”* (P3), *“el paciente debe tener siempre un guía, no sólo para saber cómo ejecutar un trabajo determinado, sino también para sentirse acompañado durante el proceso”* (P4), *“además del terapeuta, el paciente debe tener soporte en su casa”* (P6).

Por último, algunos expertos de dominio sugirieron que la ontología puede ser utilizada en el diseño de AVs de pacientes con otras patologías, p. ej. pacientes con parálisis cerebral, guillen barret o incluso para personas que han perdido su extremidad y requieren cambiar su dominancia. Algunos de los comentarios de los expertos de dominio fueron: *“es una muy buena idea, pudiera adaptarse para pacientes con parálisis cerebral, guillen barret o incluso para pacientes que han perdido su extremidad y requieren cambiar su dominancia”* (P2), *“me parecen adecuados los componentes (clases) uno liga a otro y es cíclico”* (P3, P5), *“si es necesario implementar programas [p. ej. AVs] para motivar al paciente adulto ya que la mayoría de las veces nuestros instrumentos son para niños”* (P4), *“pienso que es una herramienta que puede llegar a ser muy útil, sobre todo para poder medir el avance del*

paciente de forma más exacta, además de contar con otra herramienta para la rehabilitación del paciente” (P3).

6.5 Discusión

Los resultados de la evaluación de la ontología sugieren que el grupo de expertos de dominio (G1) consideran las clases de la ontología como *importantes* o *altamente importantes*. Las clases altamente importantes para el grupo G1 fueron *ECV*, *ConfiguracionAV*, *MedidasResultado*, y *CalibracionSeguridad*. El resto de las clases de la ontología las consideraron como *importantes*. Por lo anterior, los participantes del grupo G1 expresaron que la terapia depende de las características de la enfermedad del paciente y con base en dichas características se configura el AV. Además, para el seguimiento puntual de los pacientes se requieren medidas de salida que permitan tomar decisiones basadas en datos objetivos. De esta manera, la calibración de seguridad del dispositivo de interacción, movimientos y ejercicios dependerán de la correcta graduación (manual o automática) según el seguimiento objetivo del paciente.

Además, a pesar de que nuestros resultados sugieren diferencias significativas en el nivel de importancia de las clases, hubo coincidencia en las clases percibidas como *altamente importantes* en el grupo G1 y las mejor valoradas por el grupo de los desarrolladores de software (G2). Las clases en el grupo G2 fueron valoradas como *medianamente importantes* o *importantes*. Una posible explicación de este nivel percibido por el grupo de desarrolladores de software es la falta de experiencia en el desarrollo de aplicaciones en el área de rehabilitación y su desconocimiento en el dominio. Además, algunos desarrolladores de software comentaron en sus sugerencias que la ontología del dominio debía complementarse con otras vistas para el desarrollo de los AVs, p. ej. la arquitectura del AV (cliente-servidor, cliente-cliente, entre otras), el manejador de base de datos, los lenguajes de desarrollo que podrían usarse, la interacción entre el AV y los usuarios, entre otros. Esta percepción de los desarrolladores es comprensible porque además de la información del dominio de uso del AV, los desarrolladores de software complementan el diseño y desarrollo con metodologías de desarrollo de software y otro tipo de esquemas del área de ingeniería de software [1]. Sin embargo, el nivel de importancia alto percibido por los expertos de dominio sugiere la validez de la información de dominio contenido en la ontología para el diseño de los AVs. Además, el objetivo de la ontología propuesta en este trabajo de investigación corresponde a los factores

de diseño a considerar del dominio de rehabilitación, no a esquemas y metodologías de ingeniería de software para el desarrollo de los AVs.

Estos resultados se complementan con la alta percepción de utilidad, facilidad de uso, facilidad de aprendizaje e intención de uso de la ontología de ambos grupos que sugieren que la ontología es una herramienta efectiva para guiar el diseño de los AVs. Aunque las diferencias encontradas en la percepción de los participantes no fueron significativas, los resultados muestran evidencia que considerando el perfil de los participantes, la ontología resultó ser más fácil de usar para los desarrolladores de software (G2); mientras que fue más fácil de aprender para los expertos de dominio (G1). Adicionalmente, la alta intención de uso promedio de la ontología por parte de los expertos de dominio proporciona evidencia fuerte de la validez de la información de dominio que contiene.

Por otro lado, los comentarios de los participantes del grupo G1 sugieren el uso de la ontología en pacientes con otras patologías, p. ej. pacientes con parálisis cerebral, guillen barret o incluso para personas que han perdido su extremidad y requieren cambiar su dominancia. Además, los comentarios permiten mejorar los componentes de las clases y validar la congruencia de los elementos que componen la ontología. Por último, los comentarios resaltan que la ontología es percibida por los expertos de dominio como una herramienta útil que permitirá el diseño de AVs para medir el avance de los pacientes de una forma más exacta y motivante.

Adicionalmente, los comentarios del grupo G2 se enfocan en aspectos técnicos para complementar el diseño de los AVs. Por ejemplo, los desarrolladores de software comentan que algunos de los atributos de las clases no deben estar visibles para todo el AV. Otros comentarios se orientan a la necesidad de añadir la arquitectura del sistema o su esquema de base de datos de la ontología. Sin embargo, los desarrolladores de software comentaron que la ontología les permite tener i) un panorama general del dominio del sistema, ii) una vista global de la terapia de rehabilitación, y iii) la información necesaria para iniciar el desarrollo de AVs para la rehabilitación motriz de extremidades superiores.

Por último, de las recomendaciones de los expertos de dominio (G1) emergen temas para resaltar las características de seguridad que sirven para guiar y considerar en el diseño de los AVs. Estas características se enfocan en ocho temas emergentes que coinciden con algunos hallazgos de otras investigaciones (p. ej. [224], [262]). Por ejemplo, el tema de *ajuste de las*

estrategias de terapia resalta la modificación permanente del programa de terapia basado en las metas logradas y las que están por lograrse. El tema de la *selección y delimitación de los movimientos y su orden* se enfoca en la asignación sistemática de movimientos que van desde analíticos a globales con parámetros como fuerza, espacio de trabajo bien definidos. El tema de *selección y calibración adecuada del dispositivo de interacción* considera que las condiciones del paciente definen el tipo de dispositivo óptimo a usar en el ejercicio. La *selección adecuada de los instrumentos de medición* se basa en conocer adecuadamente el avance del paciente para complementar efectivamente el programa de terapia. El tema de la *modificación gradual de la dificultad de los ejercicios* resalta el aumento de la exigencia en el ejercicio según la respuesta del paciente. La *adaptabilidad y variabilidad del ejercicio de terapia* indica la modificación del trabajo (ejercicios) del programa adaptando el ambiente al paciente y no el paciente al ambiente. El tema de *retroalimentación acorde a las capacidades del paciente* enriquece la interacción con base al tipo de información objetiva que muestra la evolución del paciente. Por último, el tema de *soporte en tiempo real para el entrenamiento del ejercicio* tiene como meta mejorar la interacción entre el ejercicio-paciente-terapeuta para ayudar, acompañar y guiar el ejercicio evitando acciones que puedan lastimar al paciente.

6.5.1 Limitaciones

En lo mejor de nuestro conocimiento, VEULMoR es la primera ontología que incluye conceptos de rehabilitación motriz. Sin embargo, es necesario trabajar con la interoperabilidad con otras ontologías de dominio relacionadas, por ejemplo ontologías del expediente médico [125] u ontologías de diseño de dispositivos robóticos para rehabilitación [128]. Además, VEULMoR necesita ser integrada con ontologías de nivel superior que describen conceptos generales que son independientes de un problema particular o dominio.

6.6 Resumen del capítulo

Este capítulo presentó la ontología VEULMoR la cual es una representación formal del modelo de diseño del Capítulo 4 fortalecido con base en los resultados del Capítulo 5. La evaluación de VEULMoR con terapeutas físicos y ocupacionales –expertos de dominio- y desarrolladores de software permitió mejorar su contenido y estructura. Con base en los resultados de la evaluación se generaron varios aspectos los cuales se listan a continuación:

- Los resultados de la evaluación con los expertos de dominio y los desarrolladores de software proporcionan evidencia de la alta importancia, validez de la información de dominio de rehabilitación motriz de extremidades superiores de la ontología.
- Los expertos de dominio consideran *altamente importantes* las clases *ECV*, *ConfiguracionAV*, *MedidasResultado* y *CalibracionSeguridad* de la ontología.
- Con base en los comentarios y sugerencias de los participantes en la evaluación se mejoró el contenido y estructura de la ontología al integrar p. ej. la clase *Cuidador*.
- La evaluación generó ocho temas emergentes de las características de seguridad de la ontología para el diseño de los AVs.

En el siguiente capítulo presentamos el uso de la ontología con desarrolladores de software y especialistas en HCI –usuarios finales-. Con el uso de la ontología analizaremos: i) la percepción de facilidad del proceso de diseño de los AVs, ii) la percepción de facilidad de aprendizaje y utilidad de la ontología, y iii) la posibilidad de incrementar la inclusión de factores de diseño en los AVs.

Capítulo 7

Evaluación del uso de la ontología en el diseño de AVs

En el capítulo anterior se presentó la ontología VEULMoR que contiene información de dominio de rehabilitación motriz de extremidades superiores. Los resultados de la evaluación de la ontología con expertos de dominio y desarrolladores de software, sugieren que su contenido es considerado como importante o altamente. Con base en lo anterior, en este capítulo se describe una evaluación del uso de la ontología para la generación de instancias de los AVs. En la evaluación participaron desarrolladores de software y especialistas en HCI quienes son los usuarios finales de la ontología. En la evaluación de uso VEULMoR, los usuarios finales diseñaron AVs utilizando la ontología y contribuyeron en su evaluación para: 1) definir su percepción de utilidad, 2) determinar la carga de trabajo de la ontología, 3) identificar la carga de trabajo del proceso de diseño de los AVs, y 4) determinar si al usar la ontología se incrementa la posibilidad de incorporar factores de diseño en las instancias de los AVs. Por último, con base en los resultados de la evaluación surgieron criterios de muestran evidencia de la efectividad de la ontología para el diseño de los AVs.

7.1 Metodología

7.1.1 Participantes

Participaron voluntariamente 41 usuarios finales, de los cuales 29 son desarrolladores novatos, 8 desarrolladores expertos y 4 especialistas en HCI, todos ellos distribuidos de manera aleatoria en 4 grupos. El grupo uno (G1) conformado por 10 desarrolladores novatos, 2 desarrolladores expertos y 1 especialista en HCI (6 mujeres, 7 hombres, edad media 19.92 ± 2.96). El grupo dos (G2) formado por 5 desarrolladores novatos, 2 desarrolladores expertos y 1 especialista en HCI (2 mujeres, 6 hombres, edad media 27.75 ± 6.45). En el grupo tres (G3) participaron 10 desarrolladores novatos, 2 desarrolladores expertos y 1 especialista en HCI (1 mujer, 12 hombres, edad media 24.23 ± 6.48). Mientras que el grupo cuatro (G4) conformado por 4 desarrolladores novatos, 2 desarrolladores expertos y 1 especialista en HCI (1 mujer, 6 hombres, edad media 25.71 ± 6.85). Los desarrolladores expertos y especialistas en HCI pertenecientes a i) la empresa de desarrollo de software Softtek, ii) la Universidad Autónoma

de Baja California (UABC), iii) el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), y iv) el Instituto Tecnológico de Ensenada (ITE), con una experiencia promedio de 8.45 ± 1.45 años. Los desarrolladores novatos son estudiantes que se reclutaron de la carrera de licenciado en ciencias computacionales de la UABC y la carrera de ingeniería en sistemas computacionales del ITE. Únicamente un desarrollador experto declaró tener menos de 6 meses de experiencia en el desarrollo de AVs de rehabilitación motriz de extremidades superiores. Este participante fue asignado aleatoriamente a la condición experimental C1 explicada enseguida.

7.1.2 Diseño experimental y procedimiento

El experimento siguió el paradigma de diseño *between subjects*, esto es, cada grupo realizó el diseño de los AVs siguiendo una de las condiciones siguientes:

C1. Diseño del AV durante dos horas sin usar la ontología.

C2. Diseño del AV durante una hora sin usar la ontología, y luego una hora usando la ontología.

C3. Diseño del AV durante una hora sin usar la ontología, y luego una hora usando la ontología con el apoyo de un experto.

C4. Diseño del AV durante dos horas usando la ontología con el apoyo de un experto.

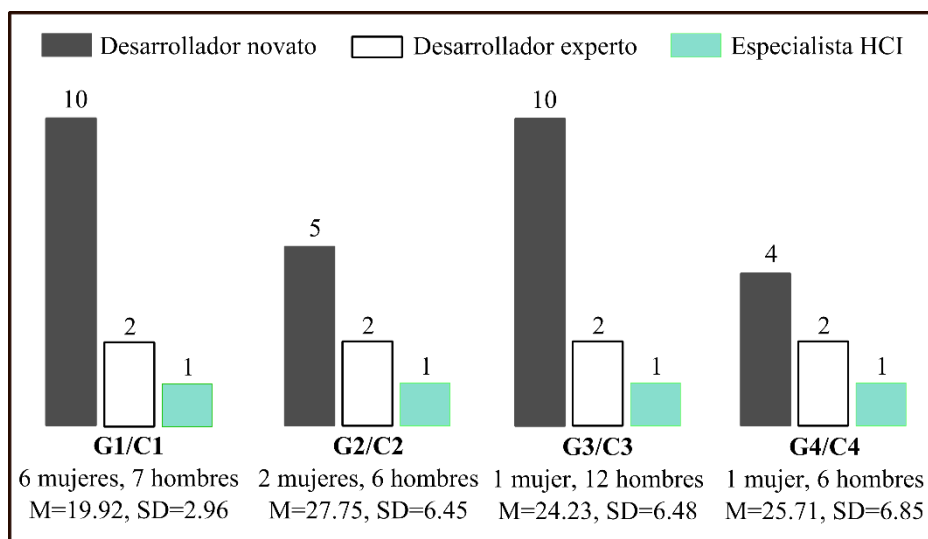


Figura 7.1. Usuarios finales que realizaron la evaluación de la ontología VEULMoR en las 4 condiciones experimentales: C1: No ontología, C2: No ontología-Ontología, C3:No ontología-

Ontología con apoyo de experto y C4: Ontología con apoyo de experto. Edad media: M, Desviación Estándar: SD.

En la primera sesión, a los participantes de todos los grupos se les explicó en 20 minutos el escenario de un paciente con una lesión cerebrovascular que requiere rehabilitación motriz de sus extremidades superiores mediante el uso de AVs. En esta explicación se les describieron las principales afectaciones que tienen los pacientes y cómo los AVs se han usado para fortalecer las terapias de rehabilitación motriz. Después, los participantes generaron prototipos de baja fidelidad para AVs usando la condición experimental que le fue asignada aleatoriamente a cada grupo (ver Figura 7.1). La ontología representada en el esquema de la Figura 6.3 (presentada en el Capítulo 6), se les entregó a los participantes de las condiciones C2, C3 y C4. La ayuda del experto consistió en la explicación detallada de la ontología previo a su uso (condiciones C3 y C4). En la segunda sesión los participantes de todas las condiciones experimentales contestaron un cuestionario NASA-TLX [241] respecto a su percepción de carga de trabajo del proceso de diseño de los AVs (ver Figura 7.2).



Figura 7.2. Usuarios finales conduciendo la evaluación. Grupos y condiciones experimentales: G1/C1 (arriba a la izquierda), G2/C2 (arriba a la derecha), G3/C3 (abajo a la izquierda), y G4/C4 (abajo en la derecha).

El cuestionario NASA-TLX usa seis dimensiones para evaluar la carga de trabajo: demanda mental, demanda física, demanda temporal, desempeño, esfuerzo y frustración (ver Tabla 5.3). Adicionalmente, los participantes de las condiciones experimentales C2, C3 y C4 contestaron 1) un cuestionario TAM (*Technology Acceptance Model*) [253] (7-puntos escala Likert) respecto a su percepción de utilidad, facilidad de uso e intención de uso de la ontología; 2) un cuestionario SUS (*System Usability Scale*) [55] (7-puntos escala Likert) respecto a su percepción de utilidad de las clases de la ontología; y 3) un cuestionario NASA TLX respecto a la percepción de carga de trabajo de la ontología.

Con base en el diseño experimental, formulamos las siguientes hipótesis:

H1. La percepción de utilidad, facilidad de uso, intención de uso de la ontología es la misma entre los participantes de las condiciones C2, C3 y C4.

H2. La percepción de utilidad de las clases de la ontología es la misma en los participantes de las condiciones C2, C3 y C4.

H3. La carga de trabajo de la ontología para los participantes de las condiciones C2, C3 y C4 es la misma.

H4. La carga de trabajo del proceso de diseño de los participantes de C1 no es la misma respecto a los participantes de las condiciones C2, C3 y C4.

H5. Se incrementa la posibilidad de integrar factores de diseño clave en las instancias de los AVs diseñados (prototipos de baja fidelidad) cuando los participantes utilizan la ontología.

7.2 Resultados

7.2.1 Percepción de utilidad, facilidad de uso e intención de uso

En la Tabla 7.1 se presenta el resumen de resultados obtenidos por los participantes para las hipótesis de la percepción de utilidad, facilidad de uso, intención de uso de la ontología (H1) y la percepción de utilidad de las clases de la ontología (H2). Los resultados de la Tabla 7.1 se basan en las respuestas generadas en el cuestionario TAM (7-puntos escala Likert) y en el cuestionario SUS (7-puntos escala Likert) por los participantes de las condiciones C2: No ontología-Ontología, C3: No ontología-Ontología con apoyo de experto y C4: Ontología con apoyo de experto. Por un lado, el cuestionario TAM generó la percepción de utilidad, facilidad de uso e intención de uso de la ontología. Por otro lado, con el cuestionario SUS se obtuvo la percepción de utilidad de las clases de la ontología. Como se observa en la Tabla 7.2, no se encontraron diferencias significativas en la percepción de utilidad, facilidad de uso e intención

de uso de la ontología (H1), tampoco se encontraron diferencias significativas en la percepción de utilidad de las clases de la ontología (H2). Estos resultados proporcionan evidencia por un lado que la falta de apoyo en el uso de la ontología no modifica significativamente la percepción de utilidad, facilidad de uso e intención de uso en los participantes (H1), lo cual sugiere que fue fácil de usar para el diseño de los AVs. Lo anterior, porque la opinión promedio externada por participantes para H1 fue de 5.68/7. Por otro lado, los resultados sugieren que la percepción de utilidad de las clases para el diseño de los AVs (H2) fue alta, siendo 6.04/7 el promedio de la opinión externada por los participantes.

Tabla 7.1. Resumen de resultados de la evaluación de la ontología VEULMoR en la percepción de utilidad, facilidad de uso e intención de uso (cuestionario TAM) y utilidad de las clases (cuestionario SUS). Condiciones experimentales: C2: No ontología-ontología, C3: No ontología-Ontología con apoyo de experto y C4: Ontología con apoyo de experto. Media: M, Rango Intercuartil: IQR.

Condición	Resultado					
	H1 (percepción de utilidad, facilidad de uso e intención de uso)			H2 (percepción de utilidad)		
	C2	C3	C4	C2	C3	C4
M	5.56	5.73	5.74	5.88	5.97	6.25
IQR	1.03	0.80	0.90	2.00	0.60	0.70

Tabla 7.2. Resumen de la prueba estadística Kruskal-Wallis en las hipótesis H1 y H2 (valor crítico $\chi^2_{\alpha,2}=5.991$) en las condiciones experimentales: C2: No ontología-ontología, C3: No ontología-Ontología con apoyo de experto y C4: Ontología con apoyo de experto.

Valor estadístico	Significado de la diferencia
H1 (percepción de utilidad, facilidad de uso e intención de uso, $\alpha=0.05$)	
1.23	No significativa
H2 (percepción de utilidad, $\alpha=0.05$)	
2.56	No significativa

7.2.2 Percepción de la carga de trabajo de la ontología

La Tabla 7.3 muestra el resumen de la carga de trabajo de la ontología. Como se puede apreciar en la Tabla 7.4 no existen diferencias significativas en la carga de trabajo de la ontología para las condiciones C2: No ontología-Ontología, C3: No ontología-Ontología con apoyo de experto y C4: Ontología con apoyo de experto. Los resultados del estadístico de

prueba sugieren que la ontología no genera una carga de trabajo significativamente diferente cuando no es explicada a los participantes (condición C2). Por lo que, los resultados sugieren que la ontología es un instrumento que los participantes perciben como fácil de aprender, que no implica frustración, esfuerzo, demanda física o mental adicional para el diseño de los AVs.

Tabla 7.3. Resumen de resultados de la evaluación de la ontología VEULMoR en términos de la carga de trabajo (demanda mental, demanda física, esfuerzo, nivel de frustración y desempeño). Condiciones experimentales: C2: No ontología-ontología, C3: No ontología-Ontología con apoyo de experto y C4: Ontología con apoyo de experto. Media: M, Rango Inter cuartil: IQR.

Condición	Resultado		
	H3 (carga de trabajo de la ontología)		
	C2	C3	C4
M	57.91	54.61	60.57
IQR	36.66	8.66	11.66

Tabla 7.4. Resumen de la prueba estadística Kruskal-Wallis en la hipótesis H3 (valor crítico $\chi^2_{\alpha,2}=5.991$) en las condiciones experimentales: C2: No ontología-ontología, C3: No ontología-Ontología con apoyo de experto y C4: Ontología con apoyo de experto.

Valor estadístico	Significado de la diferencia
H3 (carga de trabajo de la ontología, $\alpha=0.05$)	
0.78	No significativa

7.2.3 Percepción de la carga de trabajo del proceso de diseño de los AVs

El resumen de resultados de la carga de trabajo del proceso de diseño de los AVs se presenta en la Tabla 7.5. Como se aprecia en el análisis de la Tabla 7.6, existen diferencias significativas con el estadístico de prueba Kruskal-Wallis en la variación de medias entre las condiciones. Con base en estas diferencias significativas, la Tabla 7.8 muestra los resultados del análisis no paramétrico para muestras desiguales entre todas las condiciones experimentales. Los resultados de la Tabla 7.7 proporcionan evidencia de que el proceso de diseño de los AVs generó carga de trabajo diferente en los participantes que no utilizaron la ontología (condición C1: No ontología) respecto a los que si la utilizaron (condiciones C2: No ontología-Ontología, C3: No ontología-Ontología con apoyo de experto, and C4: Ontología con el apoyo de experto). De esta manera, los resultados sugieren la utilidad de la ontología

porque facilita el proceso de diseño de los AVs, esto es, genera menor esfuerzo, frustración, demanda mental y física en los participantes.

Tabla 7.5. Resumen de los resultados de la evaluación de la carga de trabajo del proceso de diseño de los AVs. Condiciones experimentales: C1: No ontología, C2: No ontología-ontología, C3: No ontología-Ontología con apoyo de experto y C4: Ontología con apoyo de experto. Media: M, Rango Intercuartil: IQR.

Condición	Resultado			
	Carga de trabajo del proceso de diseño del AV			
	C1	C2	C3	C4
M	70.92	56.04	55.02	59.57
IQR	8.66	42.33	16.66	14.33

Tabla 7.6. Resumen de la prueba estadística de Kruskal-Wallis en la hipótesis H4 (valor crítico $\chi^2_{\alpha,3}=7.815$) entre las condiciones experimentales.

Valor estadístico	Significado de la diferencia
H4 (carga de trabajo del proceso de diseño de los AVs, $\alpha=0.05$)	
16.55	Significativa

Tabla 7.7. Resumen de la prueba no paramétrica para muestras desiguales propuesta por Dunn [263] (1964) en la hipótesis H4 (valor crítico $q_{\alpha,\infty,4}=2.3948$) entre las condiciones experimentales: C1: No ontología, C2: No ontología-Ontología, C3: No ontología-Ontología con apoyo de experto, y C4: Ontología con apoyo de experto.

Comparativa	Valor estadístico	Significado de la diferencia
H4 (carga de trabajo del proceso de diseño de los AVs, $\alpha=0.1$)		
C1 vs C2	2.49	Significativa
C1 vs C3	3.88	Significativa
C1 vs C4	2.44	Significativa
C2 vs C3	0.79	No significativa
C2 vs C4	0.04	No significativa
C3 vs C4	0.80	No significativa

7.2.4 Factores de diseño incluidos en las instancias de los AVs

La Tabla 7.8 muestra un resumen del promedio de factores incluidos en el diseño de los AVs en todas las condiciones. Basados en el estadístico de prueba, la Tabla 7.9 muestra que se

encontraron diferencias significativas en el número de factores de diseño incluidos en las instancias generadas de los AVs.

Tabla 7.8. Resumen de la evaluación en términos del número de factores de diseño incluidos en las instancias de los AVs.

Condición	Resultado			
	Número de factores de diseño incluidos en los AVs			
	C1	C2	C3	C4
Sin la ontología	18.5	25	19	--
Con la ontología	--	33	27	27

Tabla 7.9. Resumen del estadístico de prueba Mann-Whitney U en la hipótesis H5 (valor crítico $U_{\alpha,(1),3,3}=8$) entre todas las condiciones experimentales.

Valor estadístico	Significado de la diferencia
H5 (número de factores de diseño incluidos en los AVs, $\alpha=0.1$)	
9	Significativa

La Figura 7.3 presenta las clases de la ontología consideradas en la evaluación conducida con los usuarios finales. Es importante señalar que los factores de las clases *MedidasResultado* e *InstrumentoMedicion* se consideraron dentro de la clase *ProgresoRehabilitacion*; mientras que los factores de la clase *AmbienteVirtual* fueron incluidos en la clase *ConfiguracionAV*. Por otro lado, las clases *Especialista*, *Cuidador*, *Paciente* y *ECV* no se incluyeron en esta evaluación por ser los usuarios de los AVs y las características inherentes de la enfermedad del paciente respectivamente. Además, tampoco se incluyó la clase *Desarrollador* dado que es el responsable de diseñar el AV.

Como se aprecia en la Figura 7.3, con el uso de la ontología para la generación de las instancias de diseño para los AVs, hubo un notable incremento de los factores de diseño en las clases *ConfiguracionAV*, *ProgresoRehabilitacion*, *ConfiguracionEjercicio*, *RetroalimentacionAumentada* y *CalibracionSeguridad*. Como mencionamos en los resultados del Capítulo 6, las clases percibidas como *altamente importantes* para los expertos de dominio fueron: *MedidasResultado* (*ProgresoRehabilitacion*), *ConfiguracionAV*, *CalibracionSeguridad* y *ECV*. Por tanto, además de la evidencia de las diferencias significativas en el número de factores incluidos en las instancias de los AVs se muestra que los factores seleccionados son de suma importancia para los expertos de dominio. De esta

manera, los resultados del uso de la ontología en el diseño de los AVs sugieren que no sólo incrementa la posibilidad de incluir un mayor número de factores, sino que también facilita la integración de factores considerados clave por los expertos de dominio.

Por otro lado, la clase *DispositivoDespliegue* no fue tomada en cuenta en las instancias de diseño de los AVs generadas por los participantes a pesar de estar integrada en la ontología. Una posible explicación de esta ausencia de factores para esta clase, es que los usuarios finales consideraron a un monitor de computadora de escritorio (despliegue no inmersivo) como la salida estándar del AV. Por lo anterior, no consideran importante este aspecto en el diseño del AV. Esta percepción coincide con los resultados de la evaluación del contenido y estructura de la ontología del Capítulo 6, donde la clase *DispositivoDespliegue* fue percibida como la menos importante tanto por los expertos de dominio (4.16/5) como por los desarrolladores de software (3.33/5).

En el caso de la clase *SoportePaciente* no fue considerada en las instancias generadas a pesar de ser una característica importante por los expertos de dominio en el diseño de los AVs. Una posible explicación, se debe a que los usuarios finales que participaron en la evaluación del uso de la ontología no contaban con experiencia en el diseño de AVs para rehabilitación motriz. Lo anterior se reflejó en algunos de sus comentarios al explicar por qué no integraron los factores de esta clase: *“no consideramos que el paciente ocupara ayuda al ejecutar su ejercicio”* (P1, C2), *“hasta ahora nos damos cuenta que si es importante darle la apoyo al paciente al ejecutar sus ejercicios”* (P5, C2), *“creí que al configurar el ejercicio e integrar la adaptabilidad, automáticamente se le apoyaba al paciente, no pensé en otro mecanismo”* (P6, C2), *“no pensamos en esta característica, es verdad, el paciente necesita apoyo en la ejecución de sus ejercicios”* (P2, C4), *“tiene(s) razón, no solo apoyo emocional, también apoyo para supervisar sus movimientos al ejecutar los ejercicios”* (P3, C5). *“no sólo motivarlo, también ayudarlo (apoyarlo) a ejecutar y terminar correctamente los ejercicios”* (P6, C5).

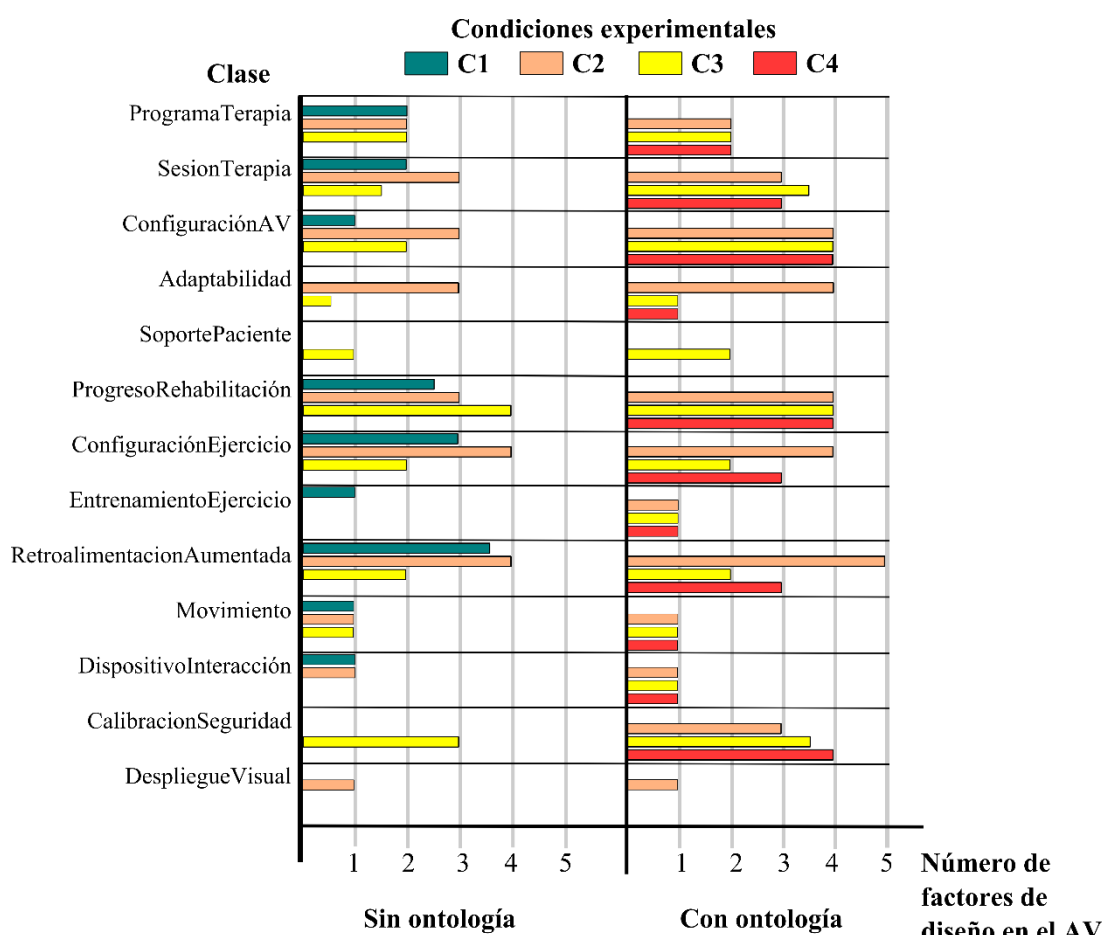


Figura 7.3. Resumen de factores de diseño incluidos en las instancias de los AVs de las diferentes condiciones experimentales.

Por último, los factores de diseño de las instancias generadas por los participantes de esta evaluación (ver Figura 7.3) fueron utilizados para iniciar la población de la ontología usando la herramienta Protégé. Por ejemplo, en la clase *ProgramaTerapia* los participantes de la condición C1 consideraron los factores de diagnóstico clínico y una descripción de tratamiento, mientras que en las condiciones C2, C3 y C4 se consideraron los mismos factores. Otro ejemplo en la clase *ConfiguracionAV* sin el uso de la ontología, en la condición C1 se incluyó el factor de la fecha de configuración, en la condición C2 la fecha de configuración, el enfoque de terapia y el tipo de entrenamiento, por último en la condición C3 se incluyó la fecha de configuración y el enfoque de terapia. Mientras que en la clase *ConfiguracionAV* con el uso de la ontología, en las condiciones C2 y C3 se agregó el lugar de uso (centro de rehabilitación, hogar del paciente) del AV, en la condición C3 también se agregó el tipo de entrenamiento y en la condición C4 se agregaron todos los factores de esta esta clase antes

mencionados. Por tanto, se cuentan con cuatro instancias almacenadas que pueden ser utilizadas como trabajo futuro para inferir conocimiento de la ontología y compartirlo con otras ontologías de dominio relacionadas.

7.3 Discusión

Con base en los resultados mostrados en las secciones 7.2.1 y 7.2.2 de este capítulo, se tiene evidencia de que la ontología es un instrumento considerado como útil, fácil de usar, con intención de usar y fácil de aprender por los desarrolladores de software y especialistas en HCI -usuarios finales. Además, de acuerdo a los resultados de la sección 7.2.3 el uso de la ontología sugiere que ayuda a disminuir la carga de trabajo en el proceso de diseño de los AVs. También, los resultados de la sección 7.2.4 proporcionan evidencia de que la ontología incrementa la posibilidad de incluir factores de diseño en las instancias de diseño de los AVs.

Respecto al sesgo que el diseño puede tener al usar o no usar un modelo, los resultados antes mencionados indican que el sesgo es bueno. Esto es, los resultados muestran evidencia de una alta usabilidad y aceptación de la ontología, igual en la carga de trabajo en la ontología -que sugiere que no implica esfuerzo, frustración, o costo mental aprenderla-, una menor carga de trabajo en el proceso de diseño, y un incremento en la posibilidad de integrar factores de diseño en las instancias de los AVs. Lo anterior, porque el modelo de diseño sugiere a los desarrolladores no sólo qué incluir, sino también les sugiere cómo incluirlo. Porque el diseño centrado en el usuario requiere conocer el contexto, y en este caso el modelo informa a los desarrolladores qué se necesita en el dominio de rehabilitación usando un AV: configurar el AV, configurar el ejercicio, considerar la seguridad del paciente en el ejercicio, determinar las métricas de desempeño, entender que el ejercicio requiere diversos entrenamientos que proporcionan una retroalimentación aumentada que es útil para el terapeuta, soporte con el terapeuta y el cuidador, las características del paciente, y las características de su ECV, entre otros.

Si bien es cierto que el diseño del AV no requiere tener todos los factores a la vez, el modelo indica qué y cómo integrar la mayor cantidad de éstos. Sin embargo, como se mencionó en la discusión del Capítulo 4, se integrarán en el diseño los factores solicitados por los especialistas en rehabilitación y aquellos basados en los recursos disponibles para el desarrollador de aplicaciones (conocimiento de lenguajes de desarrollo, dispositivos de interacción, dispositivos de medición, entre otros).

Por lo tanto, con base en 1) los resultados explicados en el Capítulo 6 en donde se evalúa la importancia percibida de la estructura y contenido de la ontología con expertos de dominio y desarrolladores de software, y 2) los resultados de este capítulo en donde los usuarios finales usaron la ontología y proporcionaron su percepción de utilidad, facilidad de uso e intención de uso, la carga de trabajo del proceso de diseño, y la carga de trabajo de la generación de las instancias para AVs, se tiene evidencia de que la ontología VEULMoR es un instrumento usable para el diseño de los AVs por los siguientes criterios:

- Su contenido y estructura es considerado como *importante o altamente importante* por los expertos de dominio.
- Se tiene evidencia de que es percibida como fácil de aprender por los desarrolladores de software y expertos de dominio.
- Es percibida como útil, fácil de usar y con intención de usar por los desarrolladores de software y expertos de dominio.
- Su uso sugiere que disminuye la carga de trabajo del proceso de diseño de los AVs.
- Su uso incrementa las posibilidades en los usuarios finales –desarrolladores de software y especialistas en HCI- de integrar factores clave para los expertos de dominio en las instancias diseño de los AVs.

7.3.1 Limitaciones

En la evaluación conducida tenemos varias limitaciones, siendo dos las principales. En primer lugar, el análisis estadístico utilizado corresponde a un diseño experimental no anidado, mientras que nuestro diseño fue anidado. En segundo lugar, es necesario integrar a más usuarios finales en la evaluación de uso de la ontología, para incrementar la validez y alcance de nuestros resultados, e identificar posibles aspectos no encontrados en la presente evaluación.

7.4 Resumen del capítulo

En este capítulo se proporciona evidencia de las ventajas de utilizar la ontología propuesta en este trabajo de investigación para la generación de instancias de diseño de los AVs. Los principales resultados de este capítulo incluyen:

- La utilidad, facilidad de uso e intención de uso. Los hallazgos sugieren que hubo una alta percepción de utilidad, facilidad de uso e intención de uso de la ontología con todos los participantes con los que se realizó la evaluación. La percepción de utilidad, facilidad de uso e intención de uso promedio fue de 5.67/7, mientras que el promedio de la utilidad percibida de las clases (SUS) fue de 6.03/7. Lo anterior, sugiere que los usuarios finales consideran a la ontología VEULMoR como un instrumento útil, fácil de usar y con intención de usar.
- La facilidad de aprendizaje. Los resultados de la carga de trabajo de la ontología generan evidencia de que es un instrumento fácil de aprender, que no genera frustración, esfuerzo, demanda física o mental adicional en los participantes.
- La facilidad del proceso de diseño de los AVs. El análisis de la carga de trabajo del proceso de diseño sugieren que el uso de la ontología en el diseño de los AVs disminuye la carga de trabajo de los participantes.
- El incremento en la posibilidad de integrar factores clave en las instancias de diseño de los AVs.

Los resultados de esta evaluación con usuarios finales dan pauta para definir en el siguiente capítulo las principales conclusiones, aportaciones y trabajo futuro derivados de la presente tesis.

Capítulo 8

Conclusiones, aportaciones y trabajo futuro

En este trabajo de tesis se atiende la problemática de facilitar el diseño de AVs para la rehabilitación motriz de extremidades superiores de pacientes con ECV. Esto fue abordado inicialmente mediante un modelo de diseño que fue caracterizado, descrito y validado en el Capítulo 4. Esto conllevó al desarrollo de un AV basado en los factores contenidos en el modelo, el cual se evaluó en términos de usabilidad con adultos mayores con problemas motrices en los brazos. Los resultados de la evaluación con adultos mayores generaron nuevos factores para la medición del progreso en la terapia de rehabilitación al ejecutar el ejercicio. Con lo anterior, se propuso la ontología VEULMoR que define formalmente el modelo de diseño en el dominio de rehabilitación motriz de extremidades superiores.

La ontología VEULMoR fue evaluada con terapeutas físicos y ocupacionales –expertos de dominio- y desarrolladores de software. La evaluación con los expertos de dominio generó evidencia de la importancia de la información y la estructura en la ontología, además emergieron características de seguridad de la ontología a considerar en el diseño de los AVs.

Adicionalmente, los desarrolladores de software y especialistas en HCI –usuarios finales- usaron la ontología para generar instancias de diseño para AVs de rehabilitación motriz de extremidades superiores. En la generación de las instancias de diseño, los usuarios finales tuvieron una percepción alta de utilidad, facilidad de uso e intención de la ontología. Por último, los resultados de la evaluación del uso de la ontología sugieren que facilita el proceso de diseño e incrementa la posibilidad de integrar factores de diseño clave en las instancias de los AVs.

En las siguientes secciones se presentan las conclusiones de este trabajo, las principales aportaciones del mismo y el trabajo a futuro.

8.1 Conclusiones

Los AVs ofrecen muchos beneficios que los hacen una herramienta útil en apoyo a las terapias de rehabilitación de pacientes con ECV. Estos beneficios incluyen el incremento en la motivación, el entretenimiento y la adherencia de los participantes, la transferencia del conocimiento motriz del entorno virtual al real, la variabilidad de los ejercicios, la intensidad

controlada de los movimientos, la retroalimentación objetiva de los resultados y el progreso del paciente, entre otros.

Sin embargo, los AVs generan un conjunto de retos que hacen más difícil su diseño, incluyendo i) la necesidad de comunicar a los desarrolladores de software con un grupo de expertos del dominio de rehabilitación, ii) que los factores de diseño sean considerados válidos por los expertos del dominio de rehabilitación, iii) el conocimiento de los dispositivos de asistencia a la rehabilitación, y iv) el conocimiento de recomendaciones de diseño, entre otros. Estos retos exigen nuevas formas de diseñar los AVs que permitan reutilizar y separar el conocimiento del dominio de rehabilitación con el conocimiento operacional. Como parte de ello, en este trabajo se enfocó en la necesidad de generar una representación del conocimiento del dominio que sea fácil de aprender por los desarrolladores de software, que sea importante para los expertos de dominio y que facilite el proceso de diseño de los AVs.

Para lo anterior, en este trabajo se inició con un proceso de entendimiento de la ECV y las características de la rehabilitación después de una ECV y cómo es que se han diseñado los AVs con retroalimentación háptica en apoyo en la terapia de rehabilitación motriz. De esta manera, se definió un conjunto de recomendaciones basadas en la revisión de la literatura que permitieron generar una taxonomía inicial para el diseño de los AVs. Esta taxonomía fue complementada con las guías del dominio clínico, los modelos y taxonomías de diseño desarrolladas por otros investigadores.

Considerando los hallazgos e ideas de diseño iniciales, se creó un modelo de diseño representado en fases, categorías y factores. Este modelo de diseño consideró factores en tres fases relacionadas a la terapia de rehabilitación motriz tradicional para pacientes con ECV. La primera validación inicial del modelo se generó al comparar sus factores con los principios de aprendizaje motriz y principios de neuroplasticidad identificados en el análisis de literatura. Además, los factores se utilizaron para ser aplicados en la clasificación de 50 AVs que cumplieron con tres criterios de inclusión: 1) AVs para pacientes con ECV o enfermedad neurológica, 2) AV evaluado con personas sanas o pacientes y 3) el alcance de la evaluación en términos de la usabilidad del AV, desempeño o prueba clínica aplicada a los pacientes. Como resultado de la clasificación de los AVs se obtuvieron diferentes mecanismos usados para adaptar los ejercicios en el AV, la clasificación los factores con base en su costo tecnológico y su impacto en la rehabilitación motriz de los pacientes. Esta validación inicial

del modelo permitió también identificar factores externos al diseño del AV que impactan en el proceso de recuperación de los pacientes.

A partir de este modelo de diseño se desarrolló un AV con el cual se condujo una evaluación para medir el efecto de la retroalimentación háptica en la percepción de usabilidad, desempeño, carga de trabajo y emociones de los participantes. Los resultados de esta evaluación generaron evidencia de la importancia de la retroalimentación háptica en la interacción con el AV y la necesidad de agregar otras métricas para el seguimiento y medición del progreso de los pacientes.

Con lo anterior, se representa formalmente el modelo mediante una ontología representada con la herramienta Protégé. Esta ontología llamada VEULMoR fue evaluada con terapeutas físicos y ocupacionales –expertos de dominio- y desarrolladores de software. Los resultados de la evaluación sugirieron una alta percepción de utilidad, facilidad de uso e intención de uso de la ontología. Además, los resultados generaron evidencia del adecuado contenido y estructura de la ontología. También, se generaron nuevos factores y una clase que fue integrada a la ontología considerando las sugerencias y comentarios de los participantes. Por último, con los comentarios de los expertos de dominio emergieron temas relacionados a las características de seguridad para el diseño de los AVs.

Adicionalmente, la evaluación del uso de la ontología con los desarrolladores de software y especialistas en HCI –usuarios finales- proporcionan evidencia de su utilidad, facilidad de uso y facilidad de aprendizaje. Además, los resultados de esta evaluación sugieren que la ontología facilita el proceso de diseño de los AVs e incrementa las posibilidades de incluir factores en las instancias de diseño de los AVs.

Además, en el desarrollo de este trabajo de tesis se fueron contestando las preguntas de investigación realizadas:

- ¿Cuáles son los factores de diseño que se deben considerar para un AV de rehabilitación motriz de extremidades superiores para pacientes con ECV?. Se propuso un conjunto de factores como resultado del análisis del contexto y el análisis de las recomendaciones de diseño para los AVs, las guías del dominio clínico, los principios de aprendizaje motriz y principios de neuroplasticidad identificados en la literatura. Además, los factores propuestos resultan de una prueba de concepto, y las recomendaciones de especialistas en

rehabilitación y desarrolladores de software. El conjunto de factores propuestos se presenta en el Capítulo 6 en este trabajo de investigación.

- ¿Cómo se puede representar formalmente el conjunto de factores de diseño para que sean considerados usables e importantes por los terapeutas físicos y ocupacionales –expertos de dominio? El conjunto final de factores propuestos se puede representar formalmente por medio de una ontología que permite, como ventajas adicionales, compartir información con otras ontologías relacionadas, e inferir conocimiento, entre otras. La descripción de la representación formal del modelo de diseño se presentó en el Capítulo 6.
- ¿Cuál es el impacto del uso de la representación formal del modelo en el diseño de AVs con desarrolladores de software y especialistas en HCI -usuarios finales? De acuerdo con la percepción de los usuarios, la representación formal del modelo facilita el proceso de diseño y aumenta la posibilidad de incluir factores de diseño clave en las instancias de los AVs; además, de que tuvo una alta aceptación y usabilidad, y de que fue percibido como fácil de aprender.

Se considera que cada uno de los objetivos específicos planteados en este trabajo de investigación fue satisfecho en el grado de los recursos disponibles y las limitaciones explicadas a lo largo de la tesis. Con base en lo anterior, se logró el objetivo principal de la investigación: definir y evaluar un modelo para el diseño de ambientes virtuales (AVs) para la terapia de rehabilitación motriz de extremidades superiores de pacientes con enfermedad cerebrovascular (ECV).

Por último, con los resultados obtenidos en los Capítulos 6 y 7 de este trabajo de investigación, se confirma la hipótesis planteada: si desarrolladores de software usan un modelo que contiene un conjunto de factores para el diseño de ambientes virtuales de rehabilitación motriz de extremidades superiores de pacientes con enfermedad cerebrovascular, entonces el modelo facilita el proceso de diseño e incrementa la posibilidad de incluir factores de diseño clave en las instancias de los AVs.

8.2 Aportaciones

La contribución principal de este trabajo de investigación es *una ontología para el diseño de AVs de terapia de rehabilitación motriz de extremidades superiores, evaluada con terapeutas ocupacionales y físicos -expertos de dominio- y desarrolladores de software*. Uno de los

aspectos principales del objetivo de esta tesis, fue generar un modelo para el diseño de los AVs de rehabilitación motriz de extremidades superiores. Este modelo representado formalmente en el dominio de rehabilitación derivó una ontología que se llamó VEULMoR (*Virtual Environment Upper Limb Motor Rehabilitation*). El desarrollo de la ontología fue hecho con la metodología METHONTOLOGY [88] y se representó utilizando la herramienta Protégé [251] en el Lenguaje de Ontologías Web (OWL). La ontología está integrada por 20 clases principales: *Especialista*, *ProgramaTerapia*, *SesionTerapia*, *AmbienteVirtual*, *Desarrollador*, *ConfiguracionAV*, *SoportePaciente*, *Adaptabilidad*, *ProgresoRehabilitacion*, *MedidasResultado*, *InstrumentoMedicion*, *ConfiguracionEjercicio*, *DespliegueVisual*, *Movimiento*, *DispositivoInteraccion*, *CalibracionSeguridad*, *EntrenamientoEjercicio*, *RetroalimentacionAumentada*, *Paciente* y *ECV*.

Por un lado, los resultados de la evaluación de la ontología VEULMoR con los expertos de dominio indicaron que consideran importante o altamente importante las clases que la conforman. Particularmente, consideraron altamente importantes las clases *ECV*, *ConfiguracionECV*, *MedidasResultado* y *CalibracionSeguridad*. Por su parte, los desarrolladores de software consideraron como medianamente importante o importante la información de las clases. Una posible explicación de esta percepción de los desarrolladores se debió a su falta de experiencia en el desarrollo de aplicaciones enfocadas a la rehabilitación motriz de pacientes. Sin embargo, hubo coincidencia en las clases mejor valoradas (consideradas importantes) respecto a las señaladas por los expertos de dominio. Estas clases fueron: *AmbienteVirtual*, *ConfiguracionAV*, *ProgresoRehabilitacion*, *CalibracionSeguridad*, *Paciente* y *ECV*. Adicionalmente, con los comentarios y sugerencias de todos los participantes se permitió mejorar el contenido de las clases y agregar una clase llamada *Cuidador*. Respecto a la percepción de usabilidad de la ontología no hubo diferencias significativas entre los expertos de dominio y desarrolladores de software. En la utilidad ambos grupos asignaron 4.5/5, en la facilidad de uso 4/5 los expertos mientras 4.16/5 los desarrolladores. En la facilidad de aprendizaje 4.33/5 de los expertos y 4/5 los desarrolladores. Por último, en la intención de uso los expertos de dominio asignaron 5/5 mientras que los desarrolladores 4.66/5. Por otro lado, con los comentarios y sugerencias de los expertos de dominio emergieron temas para las características de seguridad a considerar en el diseño de los AVs. Estos temas fueron: 1) ajuste en las estrategias de terapia, 2) selección y delimitación de los

movimientos y su orden, 3) selección y calibración adecuada del dispositivo de interacción, 4) selección adecuada de los instrumentos de medición, 5) modificación gradual de la dificultad del ejercicio, 6) adaptabilidad y variabilidad del ejercicio de terapia, 7) retroalimentación acorde a las capacidades del paciente y 8) soporte en tiempo real para el entrenamiento del ejercicio. Finalmente, los expertos de dominio sugirieron que la ontología puede ser utilizada en el diseño de AVs de pacientes con otras patologías, p. ej. pacientes con parálisis cerebral, guillen Barret o incluso para personas que han perdido su extremidad y requieren cambiar su dominancia.

Por otro lado, los resultados de la evaluación del uso de VEULMoR con los usuarios finales – desarrolladores de software y especialistas en HCI- sugieren que la ontología es percibida como útil, fácil de usar y con intención de usar. Además, los resultados muestran evidencia de que no se encontraron diferencias significativas en las diferentes condiciones experimentales en las cuales se usó la ontología. Por lo cual, los hallazgos sugieren que la ontología fue fácil de aprender, no implica frustración, demanda física o mental adicional en los participantes. Además, respecto a la carga de trabajo del proceso de diseño de los AVs, los resultados sugieren que existen diferencias significativas entre las diferentes condiciones. En particular, en el proceso de diseño de los AVs se encontraron diferencias significativas cuando los participantes no utilizaron la ontología respecto a los que si la utilizaron. Con lo anterior, se muestra evidencia de que la ontología facilita el proceso de diseño de los AVs. Por otro lado, los resultados sugieren que el uso de la ontología incrementa la posibilidad de integrar factores de diseño en las instancias de AVs generadas. Por tanto, los resultados de esta evaluación conducida con los usuarios finales sugieren que la ontología es usable para el diseño de los AVs por los siguientes criterios: i) es percibida como útil, fácil de usar y con intención de usar, ii) es fácil de aprender, iii) disminuye la carga de trabajo y facilita el proceso de diseño, iv) incrementa la posibilidad de integrar factores de diseño clave y v) su contenido y estructura es considerado como importante o altamente importante por los expertos de dominio.

Además de la contribución principal, este trabajo de investigación generó otras contribuciones que se explican enseguida.

1. *Un AV que puede ser usado en la terapia de rehabilitación motriz de extremidades superiores.* Como parte de la prueba de concepto del modelo de diseño se desarrolló un AV que fue evaluado con adultos mayores sanos y adultos mayores con problemas

motrices en su brazo. Como resultado de la evaluación se identificó que la retroalimentación háptica disminuye significativamente la carga de trabajo de los participantes y mejora la precisión en el ejercicio. Con esto se confirma lo establecido por Bachmann et al. [220] en donde establece que una interacción humano computadora eficiente y efectiva, está fuertemente influenciada por los dispositivos de entrada. Además, los resultados coinciden con los establecidos por Weber et al. [222] y Cameirão et al. [224] quienes muestran que la retroalimentación háptica durante la terapia o ejecución del ejercicio mejora el desempeño de los participantes. Por otro lado, en nuestros resultados se agrega la evidencia de que las emociones negativas en los adultos mayores con problemas motrices en su brazo son menores cuando utilizan un dispositivo con retroalimentación háptica. Por último, la combinación del análisis del desempeño, la carga de trabajo y las emociones, se confirmó la necesidad de agregar otras métricas en el modelo de diseño para determinar el progreso de la rehabilitación de los participantes.

2. *Un conjunto de datos cuantitativos y cualitativos que resultaron de las evaluaciones de la ontología con los expertos de dominio y los desarrolladores de software.* Estos datos fueron analizados estadísticamente y permitieron obtener evidencia de la percepción de utilidad, la facilidad de uso, la intención de uso, la facilidad de aprendizaje, la carga de trabajo de la ontología, la carga de trabajo del proceso de diseño de los AVs, el nivel de importancia del contenido de la ontología, sugerencias y comentarios de la estructura de la ontología.

Un resultado importante de este trabajo de investigación, lo constituyen las publicaciones realizadas. A continuación se enlistan las referencias a los trabajos publicados.

Artículo de revista:

1. **Ramírez-Fernández, C., Morán, A. L., & García-Canseco, E.,** (2016). Evaluation Results of an Ontology-based Design Model of Virtual Environments for Upper Limb Motor Rehabilitation of Stroke. *Methods of Information in Medicine* (**aceptado**).

Capítulo de libro:

1. **Ramírez-Fernández, C., García-Canseco, E., Morán, A. L., & Orihuela-Espina, F.** (2015). Design Principles for Hapto-Virtual Rehabilitation Environments: Effects on Effectiveness of Fine Motor Hand Therapy. In *ICTs for Improving Patients Rehabilitation Research*

Techniques Volume 515 of the series Communications in Computer and Information Science (pp. 270-284).

Conferencias arbitradas:

1. **Ramírez-Fernández**, C., García-Canseco, E., Morán, A. L., & Gómez-Montalvo, J. R. (2015). Ontology-based Design Model of Virtual Environments for Upper Limb Motor Rehabilitation of Stroke Patients. In *REHAB 2015, ICTs for Improving Patients Rehabilitation Research Techniques* (pp. 105-108).
2. **Ramírez-Fernández**, C., Morán, A., L., & García-Canseco, E. (2015). Haptic Feedback in Motor Hand Virtual Therapy Increases Precision and Generates Less Mental Workload. In *EAI Endorsed Transactions on Pervasive Health and Technology*. (**nominado a Best Paper**).
3. **Ramírez-Fernández**, C., Morán, A. L., García-Canseco, E., & Orihuela-Espina, F. (2014). Design Factors of Virtual Environments for Upper Limb Motor Rehabilitation of Stroke Patients. In *Proceedings of the 5th Mexican Conference on Human-Computer Interaction-MexIHC'14* (pp. 22-25). New York, New York, USA: ACM Press. (**nominado a Best Paper**).
4. **Ramírez-Fernández**, C., García-Canseco, E., & Morán, A. L. (2014). Towards a Set of Design Principles for Hapto-Virtual Rehabilitation Environments: Preliminary Results in Fine Motor Hand Therapy. In *Proceedings of the 8th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare* (Vol. 5, pp. 394-397). ICST.

Enseguida se enlistan otros resultados relacionados a nuestro trabajo de investigación:

Artículos de revista:

1. Morán, A., **Ramírez-Fernández**, C., Meza-Kubo, V., Orihuela-Espina, F., García-Canseco, E., Grimaldo, A. I. & Sucar, E. (2015). On the Effect of Previous Technological Experience on the Usability of a Virtual Rehabilitation Tool for the Physical Activation and Cognitive Stimulation of Elders. *Journal of Medical Systems*, 39(9), 104. Doi:10.1007/s10916-015-0297-0
2. Morán, A., Orihuela-Espina, F., Meza-Kubo, V., Grimaldo, A., **Ramírez-Fernández**, C., García-Canseco, E., Sucar, L. (2015). Out of context serious games: transversal

reutilization of games across healthcare domains. *International Journal of Computer Systems Science & Engineering*, 30(1), 43-55.

Capítulos de libro:

1. **Ramírez-Fernández**, C. García-Canseco, E., Morán, A., Pabloff, O., Bonilla, D., Green, N. y Meza-Kubo, V. (2016). GoodVybesConnect: A Real-Time Haptic Enhanced Tele-rehabilitation System for Massage Therapy. In book *Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence, Lecture Notes in Computer Science* (pp. 487-498).
2. Pabloff, O., Bonilla, D., Green, N., **Ramírez-Fernández**, C., García-Canseco, E., Morán, A. y Meza-Kubo, V. (2016). GoodVybesConnect: Un sistema de rehabilitación para masaje terapéutico a distancia en tiempo real. *Avances Recientes en Ciencias Computacionales, CICOMP 2016*. CreateSpace. ISBN-13: 978-1540303967 (pp. 363-367).
3. Morán, A. L., Orihuela-Espina, F., Meza-Kubo, V., Grimaldo, A. I., **Ramírez-Fernández**, C., García-Canseco, E., Oropeza-Salas, J. M., & Sucar, L. E. (2013). Borrowing a Virtual Rehabilitation Tool for the Physical Activation and Cognitive Stimulation of Elders. *CLIHIC* (pp. 95-102).

Conferencia arbitrada:

1. Morán, A., Meza, V., **Ramírez-Fernández**, C., Grimaldo, A., García-Canseco, E., Orihuela-Espina, F., & Sucar, L. (2014). Revisiting the User Experience of a Virtual Rehabilitation Tool for the Physical Activation and Cognitive Stimulation of Elders. In *IWAAL 2014, Lecture Notes in Computer Science* (pp. 203-210).

Concurso internacional IEEE Student Innovation Challenge:

1. **Ramírez-Fernández**, C., Green, N., Pabloff, O., Bonilla, D., Morán, A. L., & García-Canseco, E. (2016). Real-time Haptic Enhanced Tele-Rehabilitation System for Physical Therapy. Student Innovation Challenge Winner. *IEEE World Haptics Symposium*. Philadelphia, Pennsylvania, USA (**1er lugar absoluto**).
2. **Ramírez-Fernández**, C., Barreras-Sosa, E., Valenzuela, O., Morán, A. L., & García-Canseco, E. (2015). Phoby Therapy: Treatment of Small Animal Phobia using a Haptic Augmented Reality System. Student Innovation Challenge Finalist. *IEEE World Haptics Conference*. Chicago, Illinois, USA (**finalista, 10 mejores trabajos**).

Es importante mencionar, que aunque la información contenida en la ontología fue i) percibida importante o altamente importante por los terapeutas físicos y ocupacionales -expertos de dominio, ii) considerada con usabilidad alta por los desarrolladores de software y especialistas en HCI –usuarios finales, y iii) usada con resultados que la sugieren como un instrumento que facilita el proceso de diseño y aumenta la posibilidad para incluir factores en el diseño de los AVs, no significa que no pueda ser fortalecida con otros aspectos relacionados. Por lo anterior, en la siguiente sección se presentan y describen un conjunto de propuestas de investigación para trabajo futuro que surgen a partir de esta tesis.

8.3 Trabajo futuro

Durante la realización de este trabajo de tesis surgieron algunas observaciones o ideas que podrían haber mejorado algunos aspectos, o que a su vez proponían otros enfoques interesantes a esta línea de investigación. Sin embargo, a pesar de que dichas ideas resultaban interesantes para ser abordadas, no fueron contempladas debido al alcance de esta tesis. Estas ideas las utilizaremos para describir tres líneas de trabajo futuro:

- *Funcionalidad del prototipo de AV y la ontología.* Aunque la herramienta fue bien percibida por un grupo de usuarios potenciales, se identificaron aspectos para mejorar la usabilidad y utilidad del prototipo. Por un lado, se propone incluirle otros factores y mecanismos para mejorar el seguimiento del progreso de los pacientes que permitan obtener no sólo el desempeño sino también otras métricas de utilidad para los especialistas (terapeutas físicos, terapeutas ocupacionales, médicos). Para ello, es posible generar nuevas vistas que proporcionen el progreso de los pacientes para cada uno de los especialistas. Las métricas que se podrían integrar podrían ser el análisis del movimiento de los ojos para obtener el nivel de estrés y el esfuerzo de los pacientes al ejecutar el ejercicio. También es posible agregar el análisis automático de las emociones de los participantes mediante el uso de interfaces cerebro-computadora o el reconocimiento de los gestos faciales y corporales. Lo anterior, ayudaría a generar información objetiva para la toma de decisiones de posibles cambios en el tipo y tiempo de intervención de los pacientes. Por otro lado, es posible mejorar la forma en que se adaptan los ejercicios según las capacidades de los pacientes, mediante el uso de algoritmos para analizar en tiempo real el desempeño de los pacientes al ejecutar su ejercicio, usando p. ej. el planeador de Jerk, los procesos de Markov, entre otros [79],

[140], [164]. Otra forma de mejorar la adaptabilidad del ejercicio, sería utilizando algún modo de entrenamiento (activo, activo-asistido, pasivo, resistivo) del dispositivo de interacción háptico para asistir, guiar o restringir el movimiento de los pacientes en el ejercicio [71], [99], [131]–[138]. Por último, estas nuevas formas de medir el progreso de los pacientes o asistir la ejecución de los ejercicios pueden guiar la calibración de seguridad del espacio de trabajo, la fuerza máxima y mínima, el rango de los movimientos integrados en el AV, entre otros.

- *Inferencia de conocimiento mediante el uso de la ontología.* El objetivo general de esta tesis fue la generación de un modelo para el diseño de los AVs de rehabilitación motriz de extremidades superiores. Este modelo se definió formalmente mediante una ontología representada en la herramienta Protégé usando el lenguaje OWL. Al construirla se crearon restricciones que permiten generar la inferencia de la información contenida en la ontología. Estas restricciones se probaron al poblar la ontología con las cuatro instancias generadas en la evaluación del uso de la misma con los desarrolladores de software y especialistas en HCI –usuarios finales. Sin embargo, no se utilizaron dichas restricciones para inferir conocimiento de las instancias contenidas en la ontología. Por lo anterior, se propone aprovechar la representación de la ontología creada en Protégé y las restricciones actuales, para continuar con la población de la ontología, usar las reglas para inferir conocimiento, y compartir la información de dominio con otras ontologías relacionadas.
- *Uso de la ontología para el diseño de AV para la rehabilitación de extremidades inferiores o la rehabilitación cognitiva.* Una de las ventajas principales del uso de ontologías es permitir el re-uso del conocimiento del dominio, la expansión del conocimiento del dominio y la separación del conocimiento del conocimiento operacional. Durante la presentación de la ontología en un congreso internacional, investigadores colegas expertos en temas relacionados a la rehabilitación mencionaron que esta ontología puede usarse en apoyo al diseño AVs para la rehabilitación motriz de extremidades inferiores. Para lo anterior, recomendaron integrar otros movimientos y tipos de dispositivos de interacción para reutilizar el resto de la información de dominio de la ontología. Además, los investigadores recomendaron investigar ¿cuáles otros factores importantes se pueden integrar a la ontología para fortalecer la

rehabilitación cognitiva de los pacientes?. Por lo que, la ontología puede ser expandida en principio con las medidas de resultado necesarias para el seguimiento del progreso, además de otros factores importantes para el diseño de AVs que permitan rehabilitar no sólo la motricidad sino también la cognición. Sin embargo, cualquier clase o factor integrado a la ontología actual debe ser validado con la literatura actual, por los expertos del área de rehabilitación cognitiva de los pacientes con ECV. Por último, esas posibles modificaciones también tendrían que ser evaluadas en términos de usabilidad con los desarrolladores de software -usuarios finales- que harán uso de la información contenida en la misma.

Referencias

- [1] Y. Rogers, H. Sharp, and J. Preece, *Interaction Design: Beyond Human-Computer Interaction*. John Wiley and Sons, 2011.
- [2] M. A. Srinivasan and C. Basdogan, “Haptics in Virtual Environments: taxonomy, research status, and challenges,” *Comput. Graph.*, vol. 21, no. 4, pp. 393–404, 1997.
- [3] M. Levin, P. Weiss, and E. Keshner, “Emergence of Virtual Reality as a Tool for Upper Limb Rehabilitation: Incorporation of Motor Control and Motor Learning Principles,” *Phys. Ther.*, vol. 95, no. 3, pp. 415–426, 2015.
- [4] C. Ramírez-Fernández, E. García-Canseco, and A. L. Morán, “Towards a Set of Design Principles for Hapto-Virtual Rehabilitation Environments: Preliminary Results in Fine Motor Hand Therapy,” in *Proceedings of the 8th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare*, 2014, vol. 5, pp. 394–397.
- [5] C. Ramírez-Fernández, A. L. Morán, E. García-Canseco, and F. Orihuela-Espina, “Design Factors of Virtual Environments for Upper Limb Motor Rehabilitation of Stroke Patients,” in *Proceedings of the 5th Mexican Conference on Human-Computer Interaction - MexIHC '14*, 2014, pp. 22–25.
- [6] A. Timmermans, H. Seelen, R. Willmann, and H. Kingma, “Technology-assisted training of arm-hand skills in stroke: concepts on reacquisition of motor control and therapist guidelines for rehabilitation technology design,” *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–18, Jan. 2009.
- [7] D. Hix and J. Gabbard, “Usability Engineering of Virtual Environments,” in *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation and Applications*, 2002, pp. 681–699.
- [8] L. Sucar, F. Orihuela-Espina, R. Velazquez, D. Reinkensmeyer, R. Leder, and J. Hernandez-Franco, “Gesture Therapy: An Upper Limb Virtual Reality-Based Motor Rehabilitation Platform,” *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 22, no. 3, pp. 634–643, 2014.
- [9] H. Woldag and H. Hummelsheim, “Evidence-based physiotherapeutic concepts for improving arm and hand function in stroke patients: a review,” *J. Neurol.*, vol. 249, no. 5, pp. 518–28, May 2002.

- [10] A. Henderson, N. Korner-Bitensky, and M. Levin, "Virtual Reality in Stroke Rehabilitation: A Systematic Review of its Effectiveness for Upper Limb Motor Recovery," in *Topics in Stroke Rehabilitation*, vol. 14, no. 2, 2007, pp. 52–61.
- [11] H. Sveistrup, "Motor rehabilitation using virtual reality," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–8, Dec. 2004.
- [12] M. Holden, "Virtual Environments for Motor Rehabilitation: Review," *CyberPsychology Behav.*, vol. 8, no. 3, pp. 187–211, 2005.
- [13] M. T. Schultheis, J. Himmelstein, and A. a Rizzo, "Virtual reality and neuropsychology: upgrading the current tools.," *J. Head Trauma Rehabil.*, vol. 17, no. 5, pp. 378–394, 2002.
- [14] A. El Saddik, "Chapter 2: Haptics : Haptics Applications," in *Haptic Technologies, Springer Series on Touch and Haptic Systems*, 2011, pp. 21–43.
- [15] U. Mali, N. Goljar, and M. Munih, "Application of Haptic Interface for Finger Exercise," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 14, no. 3, pp. 352–360, Sep. 2006.
- [16] J. Mullins, C. Mawson, and S. Nahavandi, "Haptic Handwriting Aid for Training and Rehabilitation," in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2005, vol. 3, pp. 2690–2694.
- [17] Z. Xu, H. Yu, and S. Yan, "Motor Rehabilitation Training after Stroke using Haptic Handwriting and Games," in *Proceedings of the 4th International Convention on Rehabilitation Engineering & Assistive Technology*, 2010.
- [18] C. Fidopiastis, A. Rizzo, and J. Rolland, "User-centered virtual environment design for virtual rehabilitation," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 7, no. 11, pp. 1–12, 2010.
- [19] K. Stanney, M. Mollaghasemi, L. Reeves, R. Breaux, and D. Graeber, "Usability engineering of virtual environments (VEs): identifying multiple criteria that drive effective VE system design," *Int. J. Hum. Comput. Stud.*, vol. 58, no. 4, pp. 447–481, Apr. 2003.
- [20] A. Sutcliffe and B. Gault, "Heuristic evaluation of virtual reality applications," *Interact. Comput.*, vol. 16, no. 4, pp. 831–849, Aug. 2004.
- [21] D. Bowman, J. Gabbard, and D. Hix, "A Survey of Usability Evaluation in Virtual Environments: Classification and Comparison of Methods," *Presence Teleoperators*

Virtual Environ., vol. 11, no. 4, pp. 404–424, 2002.

- [22] C. Boulanger, A. Boulanger, L. Greef, A. Kearney, K. Sobel, R. Transue, Z. Sweedyk, P. Dietz, and S. Bathiche, “Stroke Rehabilitation with a Sensing Surface,” in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems- CHI '13*, 2013, pp. 1243–1246.
- [23] D. Kaber and T. Zhang, “Human Factors in Virtual Reality System Design for Mobility and Haptic Task Performance,” in *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, vol. 7, no. 1, 2011, pp. 323–366.
- [24] E. Flores, G. Tobon, E. Cavallaro, F. Cavallaro, J. Perry, and T. Keller, “Improving Patient Motivation in Game Development for Motor Deficit Rehabilitation,” in *International Conference on Advances in Computer*, 2008, pp. 381–384.
- [25] J. Burke, M. McNeill, D. Charles, P. Morrow, J. Crosbie, and S. McDonough, “Optimising engagement for stroke rehabilitation using serious games,” *Vis. Comput.*, vol. 25, no. 12, pp. 1085–1099, Aug. 2009.
- [26] S. Saini, D. Rohaya, D. Rambli, S. Sulaiman, M. Zakaria, and S. Shukri, “A Low-cost Game Framework for Home-based Stroke Rehabilitation System,” in *2012 International Conference on Computer & Information Science (ICIS)*, 2012, pp. 55–60.
- [27] S. Group, “Department of Veterans Affairs American Heart Association / American Stroke Association Guideline Summary,” 2010.
- [28] M. McDonnell, S. Hillier, and A. Esterman, “Standardizing the Approach to Evidence-Based Upper Limb Rehabilitation after Stroke,” *Top. Stroke Rehabil.*, vol. 20, no. 1, pp. 432–440, 2013.
- [29] T. Guilmette and M. L. Kennedy, “Neurocognitive rehabilitation guidelines for therapists,” *Top. Stroke Rehabil.*, vol. 2, no. 2, pp. 32–43, 1995.
- [30] J. Castillo, J. Álvarez, J. Martí-Vilalta, E. Martínez, and J. Matías-Guiu, “Concepto y clasificación de las enfermedades vasculares cerebrales,” in *Manual de Enfermedades vasculares cerebrales*, Barcelona: Prous Science, 1999, pp. 43–54.
- [31] E. Martinez-Vila, M. Murie Fernández, I. Pagola, and P. Irimia, “Enfermedades cerebrovasculares,” *Medicine (Baltimore)*, vol. 10, no. 72, pp. 4871–4881, Feb. 2011.
- [32] K. Hong and J. Saver, “Quantifying the Value of Stroke Disability Outcomes: WHO

- Global Burden of Disease Project Disability Weights for Each Level of the Modified Rankin Scale,” *Stroke*, vol. 40, no. 12, pp. 3828–3833, 2009.
- [33] P. Duncan, “Outcome measures in stroke rehabilitation,” in *Handbook of Clinical Neurology*, 1st ed., vol. 110, Elsevier B.V., 2013, pp. 105–111.
 - [34] P. Langhorne, J. Bernhardt, and G. Kwakkel, “Stroke rehabilitation,” *Lancet*, vol. 377, no. 9778, pp. 1693–702, 2011.
 - [35] V. Feigin, C. Lawes, D. Bennett, and C. Anderson, “Stroke epidemiology: a review of population-based studies of incidence, prevalence, and case-fatality in the late 20th century,” *Lancet Neurol.*, vol. 2, pp. 43–53, 2003.
 - [36] T. Truelsen, B. Piechowski-Józwiak, R. Bonita, C. Mathers, J. Bogousslavsky, and G. Boysen, “Stroke incidence and prevalence in Europe: a review of available data,” *Eur. J. Neurol.*, vol. 13, no. 6, pp. 581–98, Jun. 2006.
 - [37] A. S. Go, D. Mozaffarian, V. L. Roger, E. J. Benjamin, J. D. Berry, W. B. Borden, D. M. Bravata, S. Dai, E. S. Ford, C. S. Fox, S. Franco, H. J. Fullerton, C. Gillespie, S. M. Hailpern, J. a Heit, V. J. Howard, M. D. Huffman, B. M. Kissela, S. J. Kittner, D. T. Lackland, J. H. Lichtman, L. D. Lisabeth, D. Magid, G. M. Marcus, A. Marelli, D. B. Matchar, D. K. McGuire, E. R. Mohler, C. S. Moy, M. E. Mussolino, G. Nichol, N. P. Paynter, P. J. Schreiner, P. D. Sorlie, J. Stein, T. N. Turan, S. S. Virani, N. D. Wong, D. Woo, and M. B. Turner, “Heart disease and stroke statistics--2013 update: a report from the American Heart Association,” *Circulation*, vol. 127, no. 1, pp. e6–e245, Jan. 2013.
 - [38] G. Kwakkel, J. K. Boudewijn, and R. C. Wagenaar, “Therapy Impact on Function Recovery in Stroke Rehabilitation: A critical review of the literature,” *Physiotherapy*, vol. 85, no. 7, pp. 377–391, 1999.
 - [39] L. Goldstein, S. Adams, M. Alberts, I. Appel, L. Brass, and C. Bushnell, “Primary prevention of ischemic stroke: a guideline from the American Heart Association/American Stroke Association Stroke Council,” *Stroke*, vol. 37, no. 6, pp. 1583–1633, 2006.
 - [40] B. Fuentes, J. Gállego, A. Gil-Nuñez, A. Morales, F. Purroy, J. Roquer, T. Segura, J. Tejada, A. Lago, E. Díez-Tejedor, M. Alonso de la Leciñana, J. Álvarez-Sabin, J. Arenillas, S. Calleja, I. Casado, M. Castellanos, J. Castillo, A. Dávalos, F. Díaz-Otero, J. A. Egido, J. C. López-Fernández, M. Freijo, A. García Pastor, F. Gilo, P. Irimia, J.

- Maestre, J. Masjuan, J. Martí-Fàbregas, P. Martínez-Sánchez, E. Martínez-Vila, C. Molina, F. Nombela, M. Ribó, M. Rodríguez-Yañez, F. Rubio, J. Serena, P. Simal, and J. Vivancos, “Guía para el tratamiento preventivo del ictus isquémico y AIT (I). Actuación sobre los factores de riesgo y estilo de vida,” *Neurología*, pp. 133–183, 2011.
- [41] R. Sacco, E. Benjamin, J. Broderick, M. Dyken, J. Easton, W. Feinberg, L. Goldstein, P. Gorelick, G. Howard, S. Kittner, T. Manolio, J. Whisnant, and P. Wolf, “Risk Factors,” *Stroke*, vol. 28, pp. 1507–1517, 1997.
- [42] Who, “The International Classification of Functioning, Disability and Health,” *World Heal. Organ.*, vol. 18, p. 237, 2001.
- [43] D. Petruseviciene and A. Krisciūnas, “Evaluation of activity and effectiveness of occupational therapy in stroke patients at the early stage of rehabilitation,” *Medicina (Kaunas)*, vol. 44, no. 3, pp. 216–24, Jan. 2008.
- [44] K. Pearson-Fuhrhop, J. Kleim, and S. Cramer, “Brain Plasticity and Genetic Factors,” *Top. Stroke Rehabil.*, vol. 16, no. 4, pp. 282–299, 2009.
- [45] G. Saposnik and M. Levin, “Virtual Reality in Stroke Rehabilitation: A Meta-Analysis and Implications for Clinicians,” *Stroke*, vol. 42, no. 5, pp. 1380–1386, May 2011.
- [46] C. Schuster-Amft, K. Eng, I. Lehmann, L. Schmid, N. Kobashi, I. Thaler, M. L. Verra, A. Henneke, S. Signer, M. McCaskey, and D. Kiper, “Using mixed methods to evaluate efficacy and user expectations of a virtual reality-based training system for upper-limb recovery in patients after stroke: a study protocol for a randomised controlled trial,” *Trials*, vol. 15, p. 350, 2014.
- [47] E. Steultjens, J. Dekker, L. Bouter, J. van de Nes, E. Cup, and C. van den Ende, “Occupational Therapy for Stroke Patients: A Systematic Review,” *Stroke; a J. Am. Hear. Assoc.*, vol. 34, no. 3, pp. 676–687, Mar. 2003.
- [48] N. Norouzi-Gheidari, P. Archambault, and J. Fung, “Effects of robot-assisted therapy on stroke rehabilitation in upper limbs: Systematic review and meta-analysis of the literature,” *J. Rehabil. Res. Dev.*, vol. 49, no. 4, pp. 479–496, Jan. 2012.
- [49] P. W. Duncan, R. Zorowitz, B. Bates, J. Y. Choi, J. J. Glasberg, G. D. Graham, R. C. Katz, K. Lamberty, and D. Reker, “Management of Adult Stroke Rehabilitation Care: a clinical practice guideline,” *Stroke*, vol. 36, no. 9, pp. e100–e143, 2005.
- [50] E. A. Bayona, J. B. Prieto, and F. E. León-sarmiento, “Neuroplasticity,

- Neuromodulation, and Neurorehabilitation: Three different concepts, one only true goal,” vol. 27, no. 1, pp. 95–107, 2011.
- [51] S. J. Albert and J. Kesselring, “Neurorehabilitation of stroke,” *J. Neurol.*, vol. 259, no. 5, pp. 817–832, 2012.
 - [52] G. Berlucchi, “Brain plasticity and cognitive neurorehabilitation,” *Neuropsychol. Rehabil.*, vol. 21, no. 5, pp. 560–578, 2011.
 - [53] J. Kleim and T. Jones, “Principles of Experience-Dependent Neural Plasticity: Implications for Rehabilitation After Brain Damage,” *J. Speech, Lang. Hear. Res.*, vol. 51, no. 1, pp. S225–S239, Feb. 2008.
 - [54] R. J. Seitz, T. A. Matyas, and L. M. Carey, “Neural Plasticity As a Basis for Motor Learning and Neurorehabilitation,” vol. 9, no. 2, p. 103, 2008.
 - [55] J. Corbin and A. Strauss, “Grounded Theory Research: Procedures, Canons, and Evaluative Criteria,” *Qual. Sociol.*, vol. 13, no. 1, pp. 3–21, 1990.
 - [56] A. Mandal and S. Mokashi, “Effect of Occupational Therapy Task Oriented Approach on Recovery of Upper-extremity Motor Function and Activities of Daily Living in Stroke Patients,” *Indian J. Occup. Ther.*, vol. XLI, no. 2, pp. 31–36, 2009.
 - [57] C. Ramírez-Fernández, E. García-Canseco, A. L. Morán, and F. Orihuela-Espina, “Design Principles for Hapto – Virtual Rehabilitation Environments: Effects on Effectiveness of Fine Motor Hand Therapy,” in *ICTs for Improving Patients Rehabilitation Research Techniques Volume 515 of the series Communications in Computer and Information Science*, 2015, pp. 270–284.
 - [58] G. C. Burdea, “Virtual Reality and Robotics in Medicine,” in *International Workshop on Robot and Human Communication*, 1996, pp. 16–25.
 - [59] G. C. Burdea, “Haptic Feedback for Virtual Reality,” 1993.
 - [60] A. El Saddik, “Chapter 1: Haptics: General Principles,” in *Haptics Technologies, Springer Series on Touch and Haptic Systems*, 2011, pp. 1–20.
 - [61] C. Basdogan and M. A. Srinivasan, “Haptic Rendering in Virtual Environments,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, and IEEE Virtual Reality Conference*, 1997, vol. 1996, no. 1.
 - [62] G. Burdea, “Virtual Reality Systems and Applications,” in *Electro93 International Conference, Short Course*, 1993.

- [63] K. Salisbury, F. Conti, and F. Barbagli, "Haptic Rendering: Introductory Concepts," *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 24, no. 2, pp. 24–32, 2004.
- [64] P. Nokolakis, G. Koutsoumanos, D. Moustakas, K. Daras, "Haptic Interaction in Medical Virtual Environments," in *Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering*, no. 2, John Wiley and Sons, 2006, pp. 1–10.
- [65] G. Burdea and P. Coiffet, *Virtual Reality Technology*. John Wiley and Sons, 2003.
- [66] V. Hayward, O. R. Astley, M. Cruz-Hernandez, D. Grant, and G. Robles-De-La-Torre, "Haptic interfaces and devices," *Sens. Rev.*, vol. 24, no. 1, pp. 16–29, 2004.
- [67] D. Reinkensmeyer, J. Emken, and S. Cramer, "Robotics, Motor learning, and Neurologic Recovery," in *Annual Review of Biomedical Engineering*, vol. 6, 2004, pp. 497–525.
- [68] A. El Saddik, "Chapter 4: Machine Haptics," in *Haptics Technologies, Springer Series on Touch and Haptic Systems*, 2011, pp. 67–103.
- [69] J. Mullenbach, C. Shultz, A. M. Piper, M. Peshkin, and J. E. Colgate, "Surface haptic interactions with a TPad tablet," *Proc. Adjun. Publ. 26th Annu. ACM Symp. User interface Softw. Technol. - UIST '13 Adjun.*, pp. 7–8, 2013.
- [70] M. Ma and H. Zheng, "Virtual Reality and Serious Games in Healthcare," in *Adv. Comput. Intell.*, 2011, pp. 169–192.
- [71] H. Lo and S. Xie, "Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation: State of the art and future prospects," *Med. Eng. Phys.*, vol. 34, no. 3, pp. 261–268, Apr. 2012.
- [72] A. El Saddik, "The potential of haptics technologies," *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, vol. 10, no. 1, pp. 10–17, 2007.
- [73] P. Maciejasz, J. Eschweiler, K. Gerlach-hahn, A. Jansen-Troy, and S. Leonhardt, "A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 11, no. 3, pp. 1–29, 2014.
- [74] A. van Delden, C. Peper, G. Kwakkel, and P. Beek, "A Systematic Review of Bilateral Upper Limb Training Devices for Poststroke Rehabilitation," *Stroke Res. Treat.*, pp. 1–17, Jan. 2012.
- [75] R. A. R. C. Gopura, D. S. V Bandara, K. Kiguchi, and G. K. I. Mann, "Developments in hardware systems of active upper-limb exoskeleton robots: A review," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 75, pp. 203–220, 2016.

- [76] G. Lee, C. M. Eastman, T. Taunk, and C.-H. Ho, "Usability principles and best practices for the user interface design of complex 3D architectural design and engineering tools," *Int. J. Hum. Comput. Stud.*, vol. 68, no. 1–2, pp. 90–104, Jan. 2010.
- [77] K. Seo, J. Kim, J. Lee, S. Jang, and H. Ryu, "Serious Games for Stroke Patients: Attending to Clinical Staff 's Voices," in *The 5th International Congress of International Association of Societies of Design Research*, 2013, pp. 1–11.
- [78] D. Ines and G. Abdelkader, "Mixed Reality Serious Games: The Therapist Perspective," in *2011 IEEE 1st International Conference on Serious Games and Applications for Health, SeGAH*, 2011, no. v, pp. 1–10.
- [79] Y. Chen, N. Lehrer, H. Sundaram, and T. Rikakis, "Adaptive Mixed Reality Stroke Rehabilitation: System Architecture and Evaluation Metrics," in *Proceedings of the First Annual ACM SIGMM Conference on Multimedia Systems*, 2010, pp. 293–304.
- [80] G. Lewis, C. Woods, J. Rosie, and K. McPherson, "Virtual Reality Games for Rehabilitation: Perspectives from the Users and New Directions," in *International Conference on Virtual Rehabilitation 2011*, 2011, pp. 1–2.
- [81] D. Norman, *The Desing of Everyday Things*. New York, USA, 1990.
- [82] A. Dix, J. Finlay, G. Abowd, and R. Beale, *Human-Computer Interaction 3rd. Ed.* Pearson/Prentice-Hall, 2004.
- [83] J. Nielsen and R. Molich, "Heuristic evaluation of user interfaces," in *CHI'90 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1990, pp. 249–256.
- [84] B. Tognazzini, "First Principles of Interaction Design," *Nielsen Norman Group*, 2014. [Online]. Available: <http://asktog.com/atc/principles-of-interaction-design/>.
- [85] V. Meza-kubo, A. L. Morán, F. De Ciencias, U. Autónoma, D. B. California, K. Carr, and M. Cp, "UCSA: A Design Framework for Usable Cognitive Systems for the Worried-well," *Pers. Ubiquitous Comput.*, vol. 17, pp. 1135–1145, 2013.
- [86] A. Gómez-Pérez, M. Fernández-López, and A. de Vicente, "Towards a Method to Conceptualize Domain Ontologies," in *European Conference of Artificial Intelligence*, 1996, pp. 41–52.
- [87] R. Neches, R. E. Fikes, T. Finin, T. R. Gruber, T. Senator, and W. R. Swartout, "Enabling Technology for Knowledge Sharing," *AI Mag.*, vol. 12, no. 3, pp. 36–56,

1991.

- [88] M. Fernández-López and A. Gómez-Pérez, "Overview and analysis of methodologies for building ontologies," *Knowl. Eng. Rev.*, vol. 17, no. 2, pp. 129–156, 2002.
- [89] O. Corcho, M. Fernández-López, and A. Gómez-Pérez, "Methodologies, tools and languages for building ontologies. Where is their meeting point?," *Data Knowl. Eng.*, vol. 46, no. 1, pp. 41–64, 2003.
- [90] M. Uschold and M. King, "Towards a Methodology for Building Ontologies," in *Workshop Held in Conjunction with IJCAI on Basic Ontological Issues*, 1995, pp. 1–19.
- [91] M. Grüninger and M. S. Fox, "Methodology for the Design and Evaluation of Ontologies," in *Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing*, 1995, pp. 1–10.
- [92] A. Bernaras, I. Laresgoiti, and J. Corera, "Building and Reusing Ontologies for Electrical Network Applications," in *Proceedings of the European Conference on Artificial Intelligence*, 1996, pp. 298–302.
- [93] D. B. Lenat and R. V. Guha, *Building Large Knowledge-Based Systems*. Addison-Wesley, 1990.
- [94] B. Swartout, P. Ramesh, K. Knight, and T. Russ, "Toward Distributed Use of Large-Scale Ontologies," in *Symposium on Ontological Engineering of AAAI*, 1996, pp. 138–148.
- [95] S. Staab, R. Studer, H. P. Schnurr, and Y. Sure, "Knowledge Processes and Ontologies," *IEEE Intell. Syst.*, vol. 16, no. 1, pp. 26–34, 2001.
- [96] E. Prestes, J. L. Carbonera, S. Rama Fiorini, V. a. Vitor, M. Abel, R. Madhavan, A. Locoro, P. Goncalves, M. E. Barreto, M. Habib, A. Chibani, S. Gérard, Y. Amirat, and C. Schlenoff, "Towards a core ontology for robotics and automation," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 61, no. 11, pp. 1193–1204, 2013.
- [97] Y. Jung, S. Yeh, and J. Stewart, "Tailoring Virtual Reality Technology for Stroke Rehabilitation: A Human Factors Design," in *Computer Human Interaction*, 2006, pp. 929–934.
- [98] J. Annema, M. Verstraete, V. Abeele, S. Desmet, and D. Geerts, "Videogames in therapy: a therapist's perspective," in *International Conference on Fun and Games*, 2010, pp. 94–98.

- [99] W. Harwin, J. Patton, and V. Edgerton, "Challenges and Opportunities for Robot-Mediated Neurorehabilitation," *Proceedings IEEE*, vol. 94, no. 9, pp. 1717–1726, 2006.
- [100] G. Alankus, A. Lazar, M. May, and C. Kelleher, "Towards Customizable Games for Stroke Rehabilitation," in *Proceedings of the 28th International Conference on Human Factors in Computing Systems-CHI '10*, 2010, pp. 2113–2122.
- [101] K. Dworzynski, R. Gill, and D. Playford, "Stroke rehabilitation: long-term rehabilitation after stroke," *Clin. Med. (Northfield. Il.)*, vol. 15, no. 5, pp. 461–465, 2015.
- [102] G. Mchugh, I. D. Swain, and D. Jenkinson, "Treatment components for upper limb rehabilitation after stroke: a survey of UK national practice," *Disabil. Rehabil.*, vol. 36, no. 11, pp. 925–931, 2014.
- [103] P. Lindsay, M. Bayley, A. McDonald, I. Graham, G. Warner, and S. Phillips, "Toward a more effective approach to stroke: Canadian Best Practice Recommendations for Stroke Care," *Can. Med. Assoc. J.*, vol. 178, no. 11, pp. 1418–1425, 2008.
- [104] L. K. Casaubon, J. Boulanger, D. Blacquiere, S. Boucher, K. Brown, T. Goddard, J. Gordon, M. Horton, J. Lalonde, C. Larivière, P. Lavoie, P. Leslie, J. Mcneill, B. K. Menon, B. Moses, M. Penn, J. Perry, E. Snieder, D. Tymianski, N. Foley, E. E. Smith, G. Gubitz, M. D. Hill, E. Glasser, P. Lindsay, D. Blacquiere, S. Boucher, K. Brown, J. Gordon, M. Horton, J. Lalonde, P. Lavoie, P. Leslie, J. Mcneill, B. K. Menon, M. Penn, J. Perry, E. Snieder, D. Tymianski, E. E. Smith, and E. Glasser, "Canadian Stroke Best Practice Recommendations: Hyperacute Stroke Care Guidelines, Update 2015," *Int. J. Stroke*, vol. 11, no. 2, pp. 239–252, 2016.
- [105] R. P. S. Van Peppen, G. Kwakkel, S. Wood-Dauphinee, H. J. M. Hendriks, P. J. Van der Wees, and J. Dekker, "The impact of physical therapy on functional outcomes after stroke: what's the evidence?," *Clin. Rehabil.*, vol. 18, no. 8, pp. 833–862, Dec. 2004.
- [106] V. Mathiowetz, G. Volland, N. Kashman, and K. Weber, "Adult Norms for the Box and Block Test of Manual Dexterity," *Am. J. Occup. Ther.*, vol. 39, no. 6, pp. 386–391, 1985.
- [107] P. W. Duncan, M. Propst, and N. SG, "Reliability of the Fugl-Meyer Assessment of Sensorimotor Recovery Following Cerebrovascular Accident," *Phys. Ther.*, vol. 63, pp. 1606–1610, 1983.
- [108] a L. E. Q. van Delden, C. L. E. Peper, J. Harlaar, A. Daffertshofer, N. I. Zijp, K.

- Nienhuys, P. Koppe, G. Kwakkel, and P. J. Beek, "Comparing unilateral and bilateral upper limb training: the ULTRA-stroke program design.," *BMC Neurol.*, vol. 9, no. 1, p. 57, Jan. 2009.
- [109] E. Taub, G. Uswatte, D. K. King, D. Morris, J. E. Crago, and A. Chatterjee, "A placebo-controlled trial of constraint-induced movement therapy for upper extremity after stroke.," *Stroke; J. Am. Heart Assoc.*, vol. 37, no. 4, pp. 1045–9, Apr. 2006.
- [110] J. M. Hijmans, L. a. Hale, J. a. Satherley, N. J. McMillan, and M. J. King, "Bilateral upper-limb rehabilitation after stroke using a movement-based game controller," *J. Rehabil. Res. Dev.*, vol. 48, no. 8, p. 1005, 2011.
- [111] B. H. Dobkin, "Strategies for stroke rehabilitation," *Lancet Neurol.*, vol. 3, no. 9, pp. 528–536, 2004.
- [112] J. Whittall, W. S. McCombe, K. H. Silver, and R. F. Macko, "Repetitive bilateral arm training with rhythmic auditory cueing improves motor function in chronic hemiparetic stroke," *Stroke*, vol. 31, no. 10, pp. 2390–2395, 2000.
- [113] M. Mastos, K. Miller, A. C. Eliasson, and C. Imms, "Goal-directed training: linking theories of treatment to clinical practice for improved functional activities in daily life," *Clin. Rehabil.*, vol. 21, no. 1, pp. 47–55, 2007.
- [114] T. Kiresuk, A. Smith, and J. Cardillo, *Goal Scaling: Applications, Theory, and Measurement*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 1994.
- [115] P. Rego, P. Moreira, and L. Reis, "Serious Games for Rehabilitation- A Survey and a Classification Towards a Taxonomy," in *2010 5th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, 2010, pp. 1–6.
- [116] S. Mader, S. Narkin, and G. Levieux, "How to analyse therapeutic games: The Player/Game/ Therapy Model," *Entertain. Comput.* 2012, pp. 193–206, 2002.
- [117] D. Goude, S. Björk, and M. Rydmark, "Game Design in Virtual Reality Systems for Stroke Rehabilitation," in *Medicine Meets Virtual Reality*, vol. 2000, no. 4, 2007, pp. 146–148.
- [118] B. Pellens, O. De Troyer, W. Bille, F. Kleinermann, and R. Romero, "An Ontology-Driven Approach for Modeling Behavior in Virtual Environments," in *On the Move to Meaningful Internet Systems 2005: OTM 2005 Workshops. Lecture Notes in Computer Science*, 2005, pp. 1215–1224.

- [119] F. Pittarello and A. De Faveri, "Semantic Description of 3D Environments: a Proposal Based on Web Standards," in *Proceedings of the Eleventh International Conference on 3D Web Technology - Web3D '06*, 2006, vol. 1, pp. 85–95.
- [120] S. Tang and M. Hanneghan, "Game Content Model: An Ontology for Documenting Serious Game Design," in *Proceedings - 4th International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE 2011*, 2011, pp. 431–436.
- [121] M. Missikoff, F. Smith, and F. Taglino, "Ontology building and maintenance in collaborative virtual environments," *Concurr. Comput. Pract. Exp.*, vol. 27, no. 11, pp. 2796–2817, 2015.
- [122] C. Pelkey and J. Allbeck, "Populating semantic virtual environments," *Comput. Animat. Virtual Worlds*, vol. 25, pp. 403–410, 2014.
- [123] M. Jensen, A. Cox, N. Chaudhry, M. Ng, D. Sule, W. Duncan, P. Ray, B. Weinstock-Guttman, B. Smith, A. Ruttenberg, K. Szigeti, and A. Diehl, "The neurological disease ontology."
- [124] R. H. Scheuermann, W. Ceusters, and B. Smith, "Toward an ontological treatment of disease and diagnosis," *Transl. Bioinforma.*, pp. 116–120, 2009.
- [125] C. Zhao and L. Zhang, "Research of Information Presentation for Electronic Medical Record Based on Ontology," in *2013 6th International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, 2013, pp. 489–492.
- [126] M. Devarakonda and N. Mehta, "Cognitive Computing for Electronic Medical Records," in *Healthcare Information Management Systems*, 2016, pp. 555–577.
- [127] N. Issa, S. Byers, and S. Dakshanamurthy, "Big data: the next frontier for innovation in therapeutics and healthcare," *Expert Rev. Clin. Pharmacol.*, vol. 7, no. 3, pp. 293–298, 2014.
- [128] Z. Dogmus, E. Erdem, and V. Patoglu, "REHABROBO-ONTO: Design, development and maintenance of a rehabilitation robotics ontology on the cloud," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 33, pp. 100–109, 2015.
- [129] M. Beaudouin-Lafon, "Instrumental Interaction: An Interaction Model for Designing Post-WIMP User Interfaces," in *CHI'00 Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, 2000, vol. 2, no. 1, pp. 446–453.
- [130] S. Shultz, A. Olszewski, O. Ramsey, M. Schmitz, and V. Wyatt, "A Systematic Review

- of Outcome Tools Used to Measure Lower Leg Conditions,” *Int. J. Sports Phys. Ther.*, vol. 8, no. 6, pp. 838–848, 2013.
- [131] B. Brewer, S. McDowell, and L. Worthen-Chaudhari, “Poststroke Upper Extremity Rehabilitation: A Review of Robotic Systems and Clinical Results,” *Top. Stroke Rehabil.*, vol. 14, no. 6, pp. 22–44, 2007.
- [132] A. Basteris, S. Nijenhuis, A. Stienen, J. Buurke, G. Prange, and F. Amirabdollahian, “Training modalities in robot-mediated upper limb rehabilitation in stroke: a framework for classification based on a systematic review,” *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–15, Jan. 2014.
- [133] P. Maciejasz, J. Eschweiler, K. Gerlach-Hahn, A. Jansen-Troy, and S. Leonhardt, “A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation,” *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 11, no. 3, pp. 1–29, 2014.
- [134] P. Poli, G. Morone, G. Rosati, and S. Masiero, “Robotic Technologies and Rehabilitation: New Tools for Stroke Patients’ Therapy,” *Biomed Res. Int.*, pp. 1–8, 2013.
- [135] J. Kowalczewski and A. Prochazka, “Technology improves upper extremity rehabilitation,” in *Progress in Brain Research*, vol. 192, Elsevier B.V., 2011, pp. 147–159.
- [136] R. Riener, T. Nef, and G. Colombo, “Robot-aided neurorehabilitation of the upper extremities,” *Med. Biol. Eng. Comput.*, vol. 43, no. 1, pp. 2–10, Jan. 2005.
- [137] I. Sarakoglou, S. Kousidou, N. Tsagarakis, and D. Caldwell, “Exoskeleton-Based Exercisers for the Disabilities of the Upper Arm and Hand,” in *Rehabilitation Robotics*, no. August, 2007, pp. 499–522.
- [138] J. Hidler, D. Nichols, M. Pelliccio, and K. Brady, “Advances in the Understanding and Treatment of Stroke Impairment Using Robotic Devices,” *Top. Stroke Rehabil.*, vol. 12, no. 2, pp. 22–35, Jan. 2005.
- [139] G. V Popescu, “Design and Performance Analysis of a Virtual Reality-Based Telerehabilitation System,” 2001.
- [140] C. Loconsole, F. Bann, A. Frisoli, and M. Bergamasco, “A New Kinect-based Guidance Mode for Upper Limb Robot-aided Neurorehabilitation,” in *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2012, pp. 1037–1042.

- [141] O. Barzilay and A. Wolf, "Adaptive rehabilitation games," *J. Electromyogr. Kinesiol.*, vol. 23, no. 1, pp. 182–189, Feb. 2013.
- [142] F. Orihuela-Espina, I. Fernández del Castillo, L. Palafox, E. Pasaye, I. Sánchez-Villavicencio, R. Leder, J. H. Franco, and L. E. Sucar, "Neural reorganization accompanying upper limb motor rehabilitation from stroke with virtual reality-based gesture therapy.," *Top. Stroke Rehabil.*, vol. 20, no. 3, pp. 197–209, 2013.
- [143] M. Kuttuva, R. Boian, A. Merians, G. Burdea, M. Bouzit, J. Lewis, and D. Fensterheim, "The Rutgers Arm, a Rehabilitation System in Virtual Reality: A Pilot Study," *CyberPsychology Behav.*, vol. 9, no. 2, pp. 148–151, 2006.
- [144] M. K. Holden and T. M. A. Dyar, "Virtual Environment Training: A New Tool for Neurorehabilitation," *Neurol. Rep.*, vol. 26, pp. 62–71, 2002.
- [145] M. Baran, N. Lehrer, D. Siwiak, Y. Chen, M. Duff, T. Ingalls, and T. Rikakis, "Design of a Home-based Adaptive Mixed Reality Rehabilitation System for Stroke Survivors," in *33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2011, pp. 7602–7605.
- [146] U. Mali and M. Munih, "Haptic Interface for Finger Exercise and Virtual Rehabilitation," *First IEEE/RAS-EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics*, pp. 243–248, 2006.
- [147] D. J. Reinkensmeyer and M. L. Boninger, "Technologies and combination therapies for enhancing movement training for people with a disability.," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 9, p. 17, Jan. 2012.
- [148] L. Piron, P. Tonin, F. Cortese, M. Zampolini, F. Piccione, M. Agostini, C. Zucconi, A. Turolla, and M. Dam, "Post-stroke Arm Motor Telerehabilitation Web-based," in *2006 International Workshop on Virtual Rehabilitation*, 2006, pp. 145–148.
- [149] M.-D. Chen and J. Rimmer, "Effects of Exercise on Quality of Life in Stroke Survivors: A Meta-Analysis," *Stroke; a J. Am. Hear. Assoc.*, vol. 42, no. 3, pp. 832–837, Mar. 2011.
- [150] H. I. Krebs, B. Volpe, and N. Hogan, "A working model of stroke recovery from rehabilitation robotics practitioners.," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 6, p. 6, 2009.
- [151] N. Takeuchi and S. Izumi, "Rehabilitation with Poststroke Motor Recovery: A Review with a Focus on Neural Plasticity," *Stroke Res. Treat.*, vol. 2013, pp. 1–13, 2013.

- [152] V. S. Huang and J. W. Krakauer, "Robotic neurorehabilitation: a computational motor learning perspective," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 13, pp. 1–13, 2009.
- [153] H. Huang, S. Wolf, and J. He, "Recent developments in biofeedback for neuromotor rehabilitation," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 12, 2006.
- [154] C. Takahashi, L. Der-Yeghiaian, V. Le, R. Motiwala, and S. Cramer, "Robot-based hand motor therapy after stroke," *Brain*, vol. 131, no. 2, pp. 425–437, 2008.
- [155] H. I. Krebs, H. Hogan, M. L. Aisen, and B. T. Volpe, "Robot-aided neurorehabilitation," *IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, vol. 6, pp. 75–87, 1998.
- [156] D. J. Cech and S. Martin, "Chapter 4. Motor Control and Motor Learning," in *Functional Movement Development Across the Life Span (Third Edition)*, 2012, pp. 68–87.
- [157] L. M. Muratori, E. M. Lamberg, L. Quinn, and S. V. Duff, "Applying principles of motor learning and control to upper extremity rehabilitation," *J. Hand Ther.*, vol. 26, no. 2, pp. 94–103, 2013.
- [158] M. Iosa, G. Morone, A. Fusco, M. Bragoni, P. Coiro, M. Multari, V. Venturiero, D. De Angelis, L. Pratesi, and S. Paolucci, "Seven Capital Devices for the Future of Stroke Rehabilitation," *Stroke Res. Treat.*, pp. 1–9, Jan. 2012.
- [159] Y. Y. Huang and K. H. Low, "A Multi-Disciplinary Approach for Effective Hand Rehabilitation with Clinical-Based Assessment Outcomes," in *IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, 2009, pp. 597–603.
- [160] S. Adamovich, A. Merians, R. Boian, J. Lewis, M. Tremaine, and G. Burdea, "A Virtual Reality – Based Exercise System for Hand Rehabilitation," *Presence*, vol. 14, no. 2, pp. 161–174, 2005.
- [161] M. Rogante, M. Grigioni, D. Cordella, and C. Giacomozzi, "Ten years of telerehabilitation: A literature overview of technologies and clinical applications," *NeuroRehabilitation*, vol. 27, pp. 287–304, 2010.
- [162] H. Schmidt, S. Hesse, C. Werner, and A. Bardeleben, "Upper and lower extremity robotic devices to promote motor recovery after stroke -recent developments.," in *Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2004, vol. 7, pp. 4825–8.
- [163] A. Dromerick, P. Lum, and J. Hidler, "Activity-Based Therapies," *J. Am. Soc. Exp.*

Neurother., vol. 3, no. 4, pp. 428–438, 2006.

- [164] D. Jack, R. Boian, A. Merians, M. Tremaine, G. Burdea, S. Adamovich, M. Recce, and H. Poinzner, “Virtual Reality-Enhanced Stroke Rehabilitation,” *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 308–318, 2001.
- [165] A. Bardorfer, M. Munih, A. Zupan, and A. Primožic, “Upper Limb Motion Analysis Using Haptic Interface,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 6, no. 3, pp. 253–260, 2001.
- [166] D. Reinkensmeyer, C. Pang, J. Nessler, and C. Painter, “Web-Based Telerehabilitation for the Upper Extremity After Stroke,” *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 102–108, Jun. 2002.
- [167] S. V Adamovich, A. S. Merians, R. Boian, M. Tremaine, G. S. Burdea, M. Recce, and H. Poinzner, “A Virtual Reality Based Exercise System for Hand Rehabilitation Post-Stroke Transfer to Function,” in *IEEE EMBS 26th Annual International Conference*, 2004.
- [168] S. Yeh, A. Rizzo, W. Zhu, J. Stewart, M. McLaughlin, I. Cohen, Y. Jung, and W. Peng, “An Integrated System: Virtual Reality, Haptics and Modern Sensing Technique (VHS) for Post-Stroke Rehabilitation,” in *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 2005, pp. 59–62.
- [169] X. Luo, R. V. Kenyon, T. Kline, H. C. Waldinger, and D. G. Kamper, “An Augmented Reality Training Environment for Post-Stroke Finger Extension Rehabilitation,” in *Proceedings of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2005, pp. 329–332.
- [170] G. Srimathveeravalli and K. Thenkurussi, “Motor Skill Training Assistance Using Haptic Attributes,” in *Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2005, pp. 452–457.
- [171] I. Shakra, M. Orozco, A. El Saddik, S. Shirmohammadi, and E. Lemaire, “Haptic Instrumentation for Physical Rehabilitation of Stroke Patients,” in *MeMeA 2006 - International Workshop on Medical Measurement and Applications*, 2006, pp. 98–102.
- [172] R. Kayyali, A. Alamri, M. Eid, R. Iglesias, S. Shirmohammadi, A. El Saddik, and E. Lemaire, “Occupational therapists’ Evaluation of Haptic Motor Rehabilitation,” in

Proceedings of the 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2007, pp. 4763–4766.

- [173] S. Guo, G. Song, and Z. Song, “Development of a Self-assisted Rehabilitation System for the Upper Limbs Based on Virtual Reality,” in *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2007.
- [174] J. Stewart, S. Yeh, Y. Jung, H. Yoon, M. Whitford, S. Chen, L. Li, M. McLaughlin, A. Rizzo, and C. Winstein, “Intervention to enhance skilled arm and hand movements after stroke: A feasibility study using a new virtual reality system,” *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–6, Jan. 2007.
- [175] S. Guo and Z. Song, “VR-based Active Rehabilitation System for Upper Limbs,” in *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, 2008, pp. 1077–1082.
- [176] X. Yang, Y. Kim, Q. Wu, and Q. Chen, “Hand Function Training in Haptic Virtual Environment,” in *2006 International Conference on Mechatronics and Automation*, 2006, pp. 395–399.
- [177] S. Adamovich, G. Fluet, A. Merians, A. Mathai, and Q. Qiu, “Recovery of Hand Function in Virtual Reality: Training Hemiparetic Hand and Arm Together or Separately,” in *30th Annual International IEEE EMBS Conference*, 2008, pp. 3475–3478.
- [178] A. Alamri, M. Eid, R. Iglesias, S. Shirmohammadi, and A. Saddik, “Haptic Virtual Rehabilitation Exercises for Poststroke Diagnosis,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, no. 9, pp. 1876–1884, 2008.
- [179] J. Broeren, K. Sunnerhagen, and M. Rydmark, “Haptic virtual rehabilitation in stroke: transferring research into clinical practice,” *Phys. Ther. Rev.*, vol. 14, no. 5, pp. 322–335, Oct. 2009.
- [180] S. V Adamovich, G. G. Fluet, A. Mathai, Q. Qiu, J. Lewis, and A. S. Merians, “Design of a complex virtual reality simulation to train finger motion for persons with hemiparesis: a proof of concept study,” *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 6, p. 28, 2009.
- [181] A. S. Merians, G. G. Fluet, Q. Qiu, and S. V. Adamovich, “Robotically facilitated training of the hemiparetic upper extremity as an integrated functional unit in virtual environments,” *2009 Virtual Rehabil. Int. Conf. VR 2009*, pp. 185–188, 2009.
- [182] L. Sucar, A. Molina, R. Leder, J. Hernandez, and I. Sanchez, “Gesture Therapy: a

- Clinical Evaluation,” in *3rd International Conference on PervasiveHealth 2009*, 2009, pp. 1–5.
- [183] L. Sucar, R. Luis, R. Leder, J. Hernandez, and I. Sanchez, “Gesture therapy: a vision-based system for upper extremity stroke rehabilitation,” in *32nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2010, pp. 3690–3693.
 - [184] G. Alankus, R. Proffitt, C. Kelleher, and J. Engsberg, “Stroke Therapy through Motion-Based Games: A Case Study,” *ACM Trans. Access. Comput.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–35, Nov. 2011.
 - [185] N. Friedman, V. Chan, D. Zondervan, M. Bachman, and D. Reinkensmeyer, “MusicGlove: Motivating and Quantifying Hand Movement Rehabilitation by using Functional Grips to Play Music,” in *33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2011, pp. 2359–2363.
 - [186] C. Kaluarachchi, Y. Aung, and A. Al-Jumaily, “Virtual Games based Self Rehabilitation for Home Therapy System,” in *Proceedings of the 2011 11th International Conference on Hybrid Intelligent Systems, HIS 2011*, 2011, pp. 653–657.
 - [187] A. Karime, A. Rahman, A. El Saddik, and W. Gueaieb, “RehaBall: Rehabilitation of Upper limbs with a Sensory-Integrated Stress Ball,” in *HAVE 2011 - IEEE Symposium on Haptic Audio-Visual Environments and Games*, 2011, pp. 24–28.
 - [188] S. Yeh, S. Lee, J. Wang, S. Chen, Y. Chen, Y. Yang, H. Chen, and Y. Hung, “Virtual Reality for Post-Stroke Shoulder-Arm Motor Rehabilitation: Training System & Assessment Method,” in *2012 IEEE 14th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom)*, 2012, pp. 190–195.
 - [189] M. Mihelj, D. Novak, M. Milavec, J. Zihelr, A. Olenšek, and M. Munih, “Virtual Rehabilitation Environment Using Principles of Intrinsic Motivation and Game Design,” *Presence Teleoperators Virtual Environ.*, vol. 21, no. 1, pp. 1–15, 2012.
 - [190] S. Bhattacharya, C. Joshi, U. Lahiri, and A. Chauhan, “A Step Towards Developing a Virtual Reality Based Rehabilitation System for Individuals with Post-Stroke Forearm Movement Disorders,” in *2013 International Conference on Control, Automation, Robotics and Embedded Systems (CARE)*, 2013.
 - [191] D. Tsoupikova, N. Stoykov, D. Kamper, and R. Vick, “Virtual Reality Environment

- Assisting Post Stroke Hand Rehabilitation: Case Report,” in *Studies in Health Technology and Informatics*, vol. 184, 2013, pp. 458–464.
- [192] D. Tsoupikova, N. S. Stoykov, M. Corrigan, K. Thielbar, R. Vick, Y. Li, K. Triandafilou, F. Preuss, and D. Kamper, “Virtual Immersion for Post-Stroke Hand Rehabilitation Therapy,” *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 43, no. 2, pp. 467–477, 2015.
- [193] A. Turolla, M. Dam, L. Ventura, P. Tonin, M. Agostini, C. Zucconi, P. Kiper, A. Cagnin, and L. Piron, “Virtual reality for the rehabilitation of the upper limb motor function after stroke: a prospective controlled trial,” *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2013.
- [194] T. Tanaka, A. Kudo, S. Sugihara, T. Izumi, Y. Maeda, N. Kato, T. Miyasaka, and M. K. Holden, “A Study of Upper Extremity Training for Patients with Stroke Using a Virtual Environment System,” *J. Phys. Ther. Sci.*, vol. 25, no. 5, p. 575, 2013.
- [195] M. Vela, C. Avizzano, M. Carrozzino, A. Frisoli, and M. Bergamasco, “Multi-modal virtual reality system for accessible in-home post-stroke arm rehabilitation,” in *2013 IEEE RO-MAN: The 22nd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, 2013, pp. 780–785.
- [196] J. Metzger, O. Lambercy, A. Califfi, F. Conti, and R. Gassert, “Neurocognitive Robot-Assisted Therapy of Hand Function,” *IEEE Trans. Haptics*, vol. 7, no. 2, pp. 140–149, 2014.
- [197] J. de Gouvêa, D. Perez, C. Miranda, T. de Paula Oliveira, and M. Piemonte, “Upper Limb Training Using Virtual Reality in Patients with Chronic Sequels of Stroke,” in *Proceedings of the 3rd 2015 Workshop on ICTs for Improving Patients Rehabilitation Research Techniques*, 2015, pp. 85–88.
- [198] M. F. Levin, E. C. Magdalon, S. M. Michaelsen, and A. A. F. Quevedo, “Quality of Grasping and the Role of Haptics in a 3-D Immersive Virtual Reality Environment in Individuals With Stroke,” *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 23, no. 6, pp. 1047–1055, 2015.
- [199] H. A. Rahman, A. L. T. Narayanan, K. K. Xiang, E. S. L. Ming, Y. C. Fai, and Q. I. Khan, “iRest: Interactive rehabilitation and assessment tool,” *2015 10th Asian Control Conf.*, pp. 1–6, 2015.
- [200] B. R. Ballester, J. Nirme, E. Duarte, A. Cuxart, S. Rodriguez, P. Verschure, and A.

- Duff, "The visual amplification of goal-oriented movements counteracts acquired non-use in hemiparetic stroke patients.," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 12, no. 1, p. 50, 2015.
- [201] J. Shin, S. Bog Park, and S. Ho Jang, "Effects of game-based virtual reality on health-related quality of life in chronic stroke patients: A randomized, controlled study," *Comput. Biol. Med.*, vol. 63, pp. 92–98, 2015.
- [202] X. Yang and Y. Kim, "Hand Manipulation Training in Haptic Virtual Environments," *Int. J. Inf. Acquis.*, vol. 5, no. 3, pp. 269–281, Sep. 2008.
- [203] X. Luo, T. Kline, H. Fischer, K. Stubblefield, R. Kenyon, and D. Kamper, "Integration of augmented reality and assistive devices for post-stroke hand opening rehabilitation.," *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, vol. 7, pp. 6855–8, Jan. 2005.
- [204] D. Jack, R. Boian, A. Merians, M. Tremaine, G. Burdea, S. Adamovich, and H. Poinzner, "Virtual Reality-Enhanced Stroke Rehabilitation," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 308–318, 2001.
- [205] J. A. Bowen, "Formal Specification of User Interface Design Guidelines," 2005.
- [206] J. V. Robertson and A. Roby-Brami, "Augmented feedback, virtual reality and robotics for designing new rehabilitation methods.," in *Rethinking Physical and Rehabilitation Medicine*, no. 71, 2010, pp. 223–245.
- [207] S. Page, "Intensity Versus Task-Specificity After Stroke," *Am. J. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 82, no. 9, pp. 730–732, 2003.
- [208] M. Faizi, A. K. Azari, and S. N. Maleki, "Design Principles of Residential Spaces to Promote Children's Creativity," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 35, no. December 2011, pp. 468–474, Jan. 2012.
- [209] R. Jebsen, N. Taylor, R. Trieschmann, M. Trotter, and L. Howard, "An objective and standardized test of hand function," *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 50, no. 6, pp. 311–319, 1969.
- [210] A. Fugl-Meyer, L. Jaasko, I. Leyman, S. Olsson, and S. Steglind, "The poststroke hemiplegic patient. 1. a method for evaluation of physical performance," *Scand. J. Rehabil. Med.*, vol. 7, no. 1, pp. 13–31, 1975.
- [211] J. Kreutzer, J. Marwitz, R. Seel, and C. Serio, "Validation of a neurobehavioral functioning inventory for adults with traumatic brain injury," *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 77, no. 2, pp. 116–124, 1996.

- [212] P. Duncan, D. Wallace, S. Lai, D. Johnson, S. Embretson, and L. Laster, "The Stroke Impact Scale version 2.0: Evaluation of Reliability, Validity and Sensitivity to Change," *Stroke*, vol. 30, no. 10, pp. 2131–2140, 1999.
- [213] G. Kwakkel, R. Van Peppen, R. C. Wagenaar, S. W. Dauphinee, C. Richards, and A. Ashburn, "Effects of a augmented exercise therapy time after stroke: a meta-analysis," *Stroke*, vol. 35, p. 25, 2004.
- [214] H. B. Huang, Y.Y. and Low, K.H. and Lim, "Objective and Quantitative Assessment Methodology of Hand Functions for Rehabilitation - Closing the Gap between Clinical and Engineering Knowledge," in *International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2009, pp. 846–851.
- [215] G. Gresham, "Stroke outcome research," *Stroke*, vol. 17, no. 3, pp. 358–360, May 1986.
- [216] H. Hoffmann, P. Pastor, and S. Schaal, "Movement reproduction and obstacle avoidance with dynamic movement primitives and potential fields," *Humanoids 2008 - 8th IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robot.*, pp. 91–98, Dec. 2008.
- [217] E. Pietrzak, C. Cotea, and S. Pullman, "Using Commercial Video Games for Upper Limb Stroke Rehabilitation: Is This the Way of the Future?," *Top. Stroke Rehabil.*, vol. 21, no. 2, pp. 152–62, 2014.
- [218] R. Kizony, N. Katz, and P. L. Weiss, "Virtual reality based intervention in rehabilitation: relationship between motor and cognitive abilities and performance within virtual environments for patients with stroke," *Virtual Real.*, pp. 19–26, 2004.
- [219] Novint, "Novint Falcon," *Novint*, 2012. [Online]. Available: <http://www.novint.com>.
- [220] D. Bachmann, F. Weichert, and G. Rinkenauer, "Evaluation of the Leap Motion Controller as a New Contact-Free Pointing Device," *Sensors*, vol. 15, pp. 214–233, 2015.
- [221] J. Guna, G. Jakus, M. Pogačnik, S. Tomažič, and J. Sodnik, "An Analysis of the Precision and Reliability of the Leap Motion Sensor and Its Suitability for Static and Dynamic Tracking," *Sensors*, vol. 14, no. 2, pp. 3702–3720, Jan. 2014.
- [222] B. Weber, M. Sagardia, T. Hulin, and C. Preusche, "Visual, Vibrotactile, and Force Feedback of Collisions in Virtual Environments: Effects on Performance, Mental Workload and Spatial Orientation," in *VAMR/HCI Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1, 2013, pp. 241–250.

- [223] N. Yu, C. Xu, H. Li, K. Wang, L. Wang, and J. Liu, "Fusion of Haptic and Gesture Sensors for Rehabilitation of Bimanual Coordination and Dexterous Manipulation," *Sensors*, vol. 16, no. 3, p. 395, 2016.
- [224] M. Cameirão, S. Badia, E. Duarte, A. Frisoli, and P. Verschure, "The Combined Impact of Virtual Reality Neurorehabilitation and Its Interfaces on Upper Extremity Functional Recovery in Patients with Chronic Stroke," *Stroke; a J. Am. Hear. Assoc.*, vol. 43, no. 10, pp. 2720–2728, Oct. 2012.
- [225] M. Iosa, G. Morone, A. Fusco, M. Castagnoli, F. Fusco, L. Pratesi, and S. Paolucci, "Leap motion controlled videogame-based therapy for rehabilitation of elderly patients with subacute stroke: a feasibility pilot study," *Top. Stroke Rehabil.*, vol. 22, no. 4, pp. 306–316, 2015.
- [226] A. Petracca, M. Carrieri, D. Avola, S. Basso, S. Brigadoi, S. Lancia, M. Spezialetti, M. Ferrari, V. Quaresima, and G. Placidi, "A virtual ball task driven by forearm movements for neuro-rehabilitation," 2015, pp. 162–163.
- [227] A. H. Smeragliuolo, N. J. Hill, L. Disla, and D. Putrino, "Validation of the Leap Motion Controller using marked motion capture technology," *J. Biomech.*, pp. 1–9, 2016.
- [228] J. Taylor and K. Curran, "Using Leap Motion and Gamification to Facilitate and Encourage Rehabilitation for Hand Injuries: Leap Motion for Rehabilitation," in *Handbook of Research on Holistic Perspectives in Gamification for Clinical Practice*, vol. i, 2016, pp. 78–104.
- [229] K. M. Vamsikrishna, D. P. Dogra, and M. S. Desarkar, "Computer-Vision-Assisted Palm Rehabilitation," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 63, no. 5, pp. 991–1001, 2016.
- [230] M. Karg, A. Samadani, R. Gorbet, K. Kuhnlenz, J. Hoey, and D. Kulic, "Body Movements for Affective Expression: A Survey of Automatic Recognition and Generation," *IEEE Trans. Affect. Comput.*, vol. 4, no. 4, pp. 341–359, 2013.
- [231] R. Cowie, E. Douglas-Cowie, N. Tsapatsoulis, G. Votsis, S. Kollias, W. Fellenz, and J. G. Taylor, "Emotion Recognition in Human-Computer Interaction," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 18, no. 1, pp. 32–80, 2001.
- [232] A. Morán, C. Ramírez-Fernández, V. Meza-Kubo, F. Orihuela-Espina, E. García-Canseco, A. I. Grimaldo, and E. Sucar, "On the Effect of Previous Technological Experience on the Usability of a Virtual Rehabilitation Tool for the Physical Activation

- and Cognitive Stimulation of Elders,” *J. Med. Syst.*, vol. 39, no. 9, p. 104, 2015.
- [233] M. Maguire, “Methods to support human-centred design,” *Int. J. Human-Computer Stud.*, vol. 55, pp. 587–634, 2001.
- [234] V. C. R. Appel, V. L. Belini, D. H. Jong, D. V Magalhães, and G. A. P. Caurin, “Classifying emotions in rehabilitation robotics based on facial skin temperature,” in *Biomedical Robotics and Biomechatronics (2014 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on)*, 2014, pp. 276–280.
- [235] S. Mottura, L. Fontana, S. Arlati, A. Zangiacomi, C. Redaelli, and M. Sacco, “A virtual reality system for strengthening awareness and participation in rehabilitation for post-stroke patients,” *J. Multimodal User Interfaces*, vol. 9, no. 4, pp. 341–351, 2015.
- [236] J. Rivas, F. Orihuela-Espina, L. E. Sucar, L. Palafox, J. Hernandez-Franco, and N. Bianchi-Berthouze, “Detecting affective states in virtual rehabilitation,” in *Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth), 2015 9th International Conference on*, 2015, pp. 287–292.
- [237] G. E. Unity, “Unity Game Engine,” 2015. [Online]. Available: <http://unity3d.com>.
- [238] Blender, “Blender 2.8.” 2013.
- [239] M. Moore and J. Wilhelms, “Collision Detection and Response for Computer Animation,” *Comput. Graph. (ACM)*, vol. 22, no. 4, pp. 289–298, 1988.
- [240] A. El Saddik, M. Orozco, M. Eid, and J. Cha, “Chapter 5: Computer Haptics,” in *Haptics Technologies, Bringing Touch to Multimedia*, Springer, 2011, pp. 105–143.
- [241] S. Hart and L. Staveland, “Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research,” *Hum. Ment. Workload*, vol. 52, pp. 139–183, 1988.
- [242] S. Tomkins, *Affect Imagery Consciousness. Vol 1: The Positive Affects*. Springer, 1962.
- [243] P. Ekman, “An Argument for Basic Emotions,” *Cogn. Emot.*, vol. 6, no. 3, pp. 169–200, 1992.
- [244] A. Fabregas, C. Paternina, and A. Mancilla, *Simulación de sistemas productivos con Arena*, Uninorte. Barranquilla, Colombia, 2003.
- [245] J. H. Zar, *Biostatistical analysis*. Prentice Hall, 2010.
- [246] K. Kaur, N. Maiden, and A. Sutcliffe, “Interacting with virtual environments: an evaluation of a model of interaction,” *Interact. Comput.*, vol. 11, no. 4, pp. 403–426, Apr. 1999.

- [247] R. Studer, V. Benjamins, and D. Fensel, "Knowledge Engineering: Principles and Methods," *Data Knowl. Eng.*, vol. 25, no. 1–2, pp. 161–197, 1998.
- [248] B. Chandrasekaran, J. Josephson, and V. Benjamins, "What Are Ontologies, and Why Do We Need Them?," *IEEE Intell. Syst. their Appl.*, vol. 14, no. 1, pp. 20–26, 1999.
- [249] M. Horridge, H. Knublauch, A. Rector, R. Stevens, C. Wroe, S. Jupp, G. Moulton, N. Drummond, and S. Brandt, "A Practical Guide To Building OWL Ontologies Using Protégé 4 and CO-ODE Tools," *The University of Manchester*. pp. 0–107, 2011.
- [250] N. Noy and D. McGuinness, "Ontology development 101: A guide to creating your first ontology," *Development*, vol. 32, pp. 1–25, 2001.
- [251] J. Gennari, M. Musen, R. Fergerson, W. Grosso, M. Crubezy, H. Eriksson, N. Noy, and S. Tu, "The evolution of Protégé: an environment for knowledge-based systems development," *Int. J. Hum. Comput. Stud.*, vol. 58, no. 1, pp. 89–123, 2003.
- [252] M. Marian, "Ontologies Representation and Management, as a Semantic Tool for Organizational Memory Consolidation," *Ann. Univ. Oradea, Econ. Sci. Ser.*, vol. 18, no. 4, pp. 976–980, 2009.
- [253] F. Davis, "Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology," *MIS Q.*, vol. 13, no. 3, pp. 319–340, 1989.
- [254] J. L. Szalma, "Individual differences in performance, workload, and stress in sustained attention: Optimism and pessimism," *Pers. Individ. Dif.*, vol. 47, no. 5, pp. 444–451, 2009.
- [255] C. Rose, L. Murphy, L. Byard, and K. Nikzad, "The Role of the Big Five Personality Factors in Vigilance Performance and Workload," *Eur. J. Pers.*, vol. 16, no. 3, pp. 185–200, 2002.
- [256] C. Ha, J. Kim, S. Lee, and P. Seong, "Investigation on Relationship Between Information Flow Rate and Mental Workload of Accident Diagnosis Tasks in NPPs," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 53, no. 3, pp. 1450–1459, 2006.
- [257] D. Watson, "Development and validation of brief measures of positive and negative affect: the PANAS scales," *J. Pers. Soc. Psychol.*, vol. 54, no. 6, pp. 1063–70, 1988.
- [258] G. Csukly, P. Czobor, L. Simon, and B. Takács, "Basic emotions and psychological distress: association between recognition of facial expressions and Symptom Checklist-90 subscales," *Compr. Psychiatry*, vol. 49, no. 2, pp. 177–183, 2008.

- [259] S. Rubio, E. Díaz, J. Martín, and J. M. Puente, “Evaluation of Subjective Mental Workload : A Comparison of SWAT , NASA-TLX , and Workload Profile Methods,” vol. 53, no. 1, pp. 61–86, 2004.
- [260] J. Nielsen and R. Molich, “Heuristic Evaluation of User Interfaces,” in *Computer Human Interaction*, 1990, no. April, pp. 249–256.
- [261] J. Brooke, “SUS - A quick and dirty usability scale,” *Usability Eval. Ind.*, pp. 189–194, 1996.
- [262] C. Ramírez-Fernández, A. L. Morán, and E. García-Canseco, “Haptic Feedback in Motor Hand Virtual Therapy Increases Precision and Generates Less Mental Workload,” in *EAI Endorsed Transactions On Pervasive Health and Technology*, 2015.
- [263] O. Dunn, “Multiple contrasts using rank sums,” *Technometrics*, vol. 6, pp. 241–252, 1964.