

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE ESTIMULACIÓN MUSCULAR PARA
MITIGAR LA ESPASTICIDAD EN NIÑOS CON PARÁLISIS CEREBRAL
MEDIANTE VIBROTERAPIA**



DANIELA PINEDA MONTERROSA

VÍCTOR DAMIÁN MUÑOZ

Director: PhD (c). Andrés Felipe Solis Pino

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA INGENIERÍA MECATRÓNICA

POPAYÁN

2024

**DANIELA PINEDA MONTERROSA
VICTOR DAMIAN MUÑOZ**

Ingeniería Mecatrónica

Proyecto de grado para la obtención del título de ingeniero mecatrónico

Director: PhD (c). Andrés Felipe Solís Pino

**Popayán
2024**

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Popayán, 7 de junio 2024

DEDICATORIA

A mi mamá, fuente inagotable de amor y fortaleza, por cada sacrificio y por enseñarme con su ejemplo el verdadero significado de la dedicación y el esfuerzo. Tu fe en mí ha sido la luz que ha guiado mi camino. A mis maestros, por ser faros de sabiduría y paciencia, y por nutrir mi mente con conocimiento y mis sueños con posibilidades. Sus enseñanzas han dejado huellas imborrables en mi vida. A mis amigos, compañeros de alegrías y desafíos, por su incondicional apoyo, por las risas compartidas y por ser mi refugio en los momentos de incertidumbre. Su amistad ha sido mi ancla y mi aliento. A mis abuelos, guardianes de la memoria y la tradición, por su amor eterno y por enseñarme con su vida los valores que verdaderamente importan. Sus historias y consejos han sido mi inspiración y mi guía.

A todos ustedes, con gratitud eterna y profundo cariño, dedico este logro. Este viaje no habría sido posible sin su presencia y su apoyo constante. Gracias por creer en mí.

AGRADECIMIENTOS

A lo largo de esta ardua travesía académica, he tenido la fortuna de contar con el apoyo y la guía de muchas personas que han sido fundamentales para la culminación de esta tesis de grado. En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor de tesis, cuyo conocimiento, paciencia y dedicación han sido invaluable. Sus consejos y su incansable apoyo me han permitido superar los desafíos más complejos de este proyecto. Asimismo, quiero extender mi gratitud a todos los docentes que me acompañaron a lo largo de mi carrera. Sus enseñanzas no solo han enriquecido mi conocimiento, sino que también han formado mi carácter y mi manera de ver el mundo. Cada clase, cada conversación y cada consejo han dejado una huella imborrable en mi formación profesional y personal.

No podría dejar de mencionar a mi madre, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido el pilar sobre el cual he construido mis logros. Su fe en mí, incluso en los momentos más difíciles, ha sido la fuerza motriz que me ha impulsado a seguir adelante. Gracias, mamá, por estar siempre ahí, por tus palabras de aliento y por tu sacrificio constante.

También quiero dedicar un espacio para agradecer a la ciencia, que, con su insaciable búsqueda de la verdad y el conocimiento, nos proporciona las herramientas necesarias para comprender y mejorar nuestro mundo. La ciencia ha sido la base sobre la cual he construido esta tesis, y su rigurosidad y método me han guiado a lo largo de todo este proceso.

Finalmente, quiero expresar mi profunda gratitud a Dios, por darme la fortaleza, la sabiduría y la paciencia para enfrentar cada reto que se presentó en este camino. Su presencia ha sido un faro de esperanza y tranquilidad, iluminando mi senda en momentos de incertidumbre y llenándome de valor para perseverar. A todos ustedes, gracias de corazón. Sin su apoyo, esta tesis no habría sido posible.

Resumen

Esta investigación presenta el diseño y desarrollo de un prototipo mecatrónico denominado «VibroGym Kids: ¡Mueve tu Poder!» destinado a optimizar la estimulación muscular en las extremidades superiores de niños con parálisis cerebral, centrándose en la reducción controlada de la espasticidad causada por lesiones en las neuronas motoras superiores. El prototipo permite realizar terapias en casa, utilizando un gimnasio infantil y componentes vibratorios aislados, cumpliendo con la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5663 de seguridad en máquinas para procedimientos terapéuticos no pasivos.

Las estrategias actuales para el tratamiento de la espasticidad incluyen la administración de toxina botulínica y la electroestimulación mediante chalecos de electrodos. Sin embargo, estos métodos presentan riesgos de reacciones alérgicas y desgarros musculares irreversibles, respectivamente, sobre todo sin una supervisión adecuada. En respuesta a estas limitaciones, se concibió «VibroGym Kids» mediante una metodología de diseño mecatrónico y la Evaluación y Análisis de Viabilidad de Proyectos de Investigación. El dispositivo pretende superar las restricciones de los métodos tradicionales proporcionando una plataforma terapéutica adaptable a las rutinas de los niños y segura para su rehabilitación.

La parálisis cerebral, una afección neurológica común en niños, tiene una incidencia global de 2 a 2,5 casos por cada 1.000 nacimientos, siendo la espasticidad un síntoma frecuente que afecta significativamente a su calidad de vida. Este proyecto pretende introducir un enfoque innovador y esencial para abordar los retos en la terapia de estos pacientes, mejorando su calidad de vida y ofreciendo nuevas oportunidades comerciales y terapéuticas al posibilitar terapias domiciliarias y reducir los riesgos de los tratamientos farmacológicos tradicionales.

El proceso de validación del prototipo contó con la participación de expertos en neuropediatría y fisioterapeutas especializados en enfermedades neurológicas. Se

utilizaron metodologías de análisis de la marcha, evaluación del equilibrio y evaluación funcional para medir la eficacia del prototipo. Se diseñó y aplicó una encuesta para fisioterapeutas en la que se evaluaron aspectos como la satisfacción con el dispositivo, la facilidad de uso de la interfaz y la eficacia en la mitigación de la espasticidad. La validación realizada con niños, con parálisis cerebral, observó que el prototipo cumple su propósito, aunque se sugirieron mejoras como ajustar la altura de la cama y ampliar el rango de edad de la población destinataria. Los resultados de la encuesta indicaron una aceptación mayoritaria del prototipo, considerándolo eficaz y seguro para las terapias domiciliarias.

Abstract

This research presents the design and development of a mechatronic prototype called "VibroGym Kids: Move your Power!" aimed at optimizing muscle stimulation in the upper extremities of children with cerebral palsy, focusing on the controlled reduction of spasticity caused by lesions in the upper motor neurons. The prototype allows therapies at home, using a children's gym and isolated vibratory components, complying with Colombian Technical Standard (NTC) 5663 on machine safety for non-passive therapeutic procedures.

Current strategies for treating spasticity include administering botulinum toxin and electrostimulation using electrode vests. However, these methods present risks of allergic reactions and irreversible muscle tears, respectively, especially without adequate supervision. In response to these limitations, "VibroGym Kids" was conceived using a mechatronic design methodology and Research Project Feasibility Assessment and Analysis. The device aims to overcome the constraints of traditional methods by providing a therapeutic platform that is adaptable to children's routines and safe for their rehabilitation.

Cerebral palsy, a common neurological condition in children, has a global incidence of 2 to 2.5 cases per 1,000 births, with spasticity being a frequent symptom that significantly affects their quality of life. This project aims to introduce an innovative and essential approach to address the challenges in the therapy of these patients, improving their quality of life and offering new commercial and therapeutic opportunities by enabling home therapies and reducing the risks of traditional pharmacological treatments.

The prototype validation process involved neuropsychiatry experts and physiotherapists specializing in neurological diseases. Gait analysis, balance assessment, and functional assessment methodologies were used to measure the effectiveness of the prototype. A survey for physiotherapists was designed and applied to evaluate aspects

such as satisfaction with the device, ease of interface use, and efficacy in spasticity mitigation. Validation conducted with children with cerebral palsy noted that the prototype fulfills its purpose, although improvements such as adjusting the bed height and broadening the age range of the target population were suggested. The survey results indicated a majority acceptance of the prototype, considering it effective and safe for home therapies.

Tabla de contenido

Resumen	vi
Abstract	viii
Introducción	15
Planteamiento del problema	16
Justificación	18
Objetivos	20
1.1.1. Objetivo general	20
1.1.2. Objetivos específicos	20
Marco teórico y conceptual	21
Conceptos relacionados con PCI:	21
Conceptos relacionados con miembros inferiores	24
Conceptos relacionados con sensibilidad muscular	25
Conceptos relacionados con metodologías para terapias neuromotoras	27
Antecedentes	28
Metodología	31
Análisis Bibliométrico sobre los tratamientos relacionados con la espasticidad en niños	33
2.1. Recopilación de información	34
2.2. Resultados y análisis de resultados	35
2.3. Información general del análisis bibliométrico	35
2.4. Producción científica anual	36
2.5. Autores destacados del campo	37
2.6. Afilación producción universitaria	38
2.7. Producción científica por países	40
2.8. Estructural conceptual del dominio	41
2.9. Discusión	44
Conclusiones parciales	45
Desarrollo del prototipo para apoyar la rehabilitación de parálisis cerebral espástica: VibroGym kids	46
3.1. Etapa 1. Matriz de casa	47
3.2. Etapa 2. Análisis del sistema	48
3.2.1. Boceto a mano alzada	49
3.2.2. Diseño CAD y CAE del prototipo Vibrogym Kids	49
3.2.3. Diseño CAD Estructura Modular	50

3.2.4.	Diseño CAD sistema de elevación.....	53
3.2.5.	Diseño CAD del sistema vibratorio	55
3.2.6.	Descripción y ejecución del material acero estructural a529 grado 50	60
3.2.7.	Ejecución y análisis CAE del sistema propuesto	63
3.3.	Etapa 3. Construcción del prototipo	66
3.3.1.	Construcción física de la estructura mecánica del prototipo	66
3.3.2.	Sistema electrónico del dispositivo propuesto	78
3.3.3.	Desarrollo software de VibroGym KIDS.....	85
3.3.4.	Creación de página web relacionada con el dispositivo propuesto.....	89
	Resultados y validaciones	93
4.1	Diseño del experimento	93
4.1.1	Encuesta de validación	93
4.2	Ejecución experimental	94
4.3	Resultados de las encuestas	96
	Conclusiones y trabajos futuros	98
5.1	Conclusiones	98
5.2	Trabajos futuros	100
	Lista de referencias	101

Lista de tablas

Tabla 1. Cadena de búsqueda aplicada sobre Scopus	34
Tabla 2. Propiedades mecánicas soldadura arco eléctrico	72

Lista de imágenes

Figura 1. Día Mundial de la Parálisis Cerebral Infantil.....	21
Figura 2 Grados de espasticidad según hemisferio afectado.....	22
Figura 3. Raíces nerviosas de la medula espinal.....	23
Figura 4. Desarrollo motor en la primera infancia.....	23
Figura 5. Displasia debido a articulación inestable.....	24
Figura 6. Espasticidad muscular.....	25
Figura 7. Curvas de resistencia.....	27
Figura 8. Filtro exportar CSV.....	35
Figura 9. Información principal estadística.....	36
Figura 10. Producción científica anual.....	37
Figura 11. Producción autores destacados.....	38
Figura 12. Documentos por afiliación.....	39
Figura 13. Producción científica por países.....	41
Figura 14. Mapa temático evolución tópicos de crecimiento.....	42
Figura 15. Metodología utilizada en la investigación - V cuadrante.....	47
Figura 16. Matriz de casa de calidad utilizada para reunir requerimientos.....	48
Figura 17. Boceto a mano alzada.....	49
Figura 18. Diseño CAD ensamble estructura inferior.....	51
Figura 19. Diseño CAD – incorporación base cama.....	52
Figura 20. Diseño CAD con sistema de elevación.....	52
Figura 21. Diseño CAD chumacera soporte de elevación de camilla.....	53
Figura 22. Diseño CAD Soporte Elevación.....	54
Figura 23. Diseño CAD varilla roscada ASTM A1.....	54
Figura 24. Diseño CAD motor elevación.....	55
Figura 25. Diseño CAD encapsulado-motores.....	56
Figura 26. Diseño CAD cuello.....	57
Figura 27. Diseño CAD espalda.....	58
Figura 28. Motor vibrador implementado en el sistema vibratorio.....	59
Figura 29. Encapsulado espalda software CURA.....	59
Figura 30. Diseño CAD sin sistema vibratorio.....	60
Figura 31. Características químicas material creado.....	61
Figura 32. Gráfica esfuerzo vs deformación material ASTM A529.....	62
Figura 33. Creación del material en SolidWorks.....	63

Figura 34 Factor de seguridad CAE análisis de elementos finitos.....	65
Figura 35. Diseño unión atornillada	67
Figura 36. Deformidad unión atornillada.....	68
Figura 37. Diseño unión atornillada – soldada.....	69
Figura 38. Deformidad unión atornillada- soldada	69
Figura 39. Diseño uniones soldadas	70
Figura 40. Deformación uniones soldadas	71
Figura 41. Utilización de soldadura de arco eléctrico	73
Figura 42. Aplicación de varias capas de anticorrosivo.....	74
Figura 43. Estructura con pintura amarilla - color final	75
Figura 44. Imagen real sistema de elevación acoplado con caja reductora	76
Figura 45. Imagen real - Estructura modular parte robusta	77
Figura 46. Imagen real – Prototipo completamente ensamblada la parte mecánica y estructural.....	78
Figura 47 Convertidor LM2596 sistema vibratorio	79
Figura 48. Esquemático de conexión Arduino - Relés - Motor de elevación	80
Figura 49 Conexión electrónica sistema elevación.....	80
Figura 50 MPU6050 con esquemático de ejes	81
Figura 51 Conexión pantalla OLED-MPU-Arduino	81
Figura 52 Esquema de conexión control de elevación manual.....	83
Figura 53 Sistema conexión pulsadores con Arduino.....	84
Figura 54 Tablero de control proyecto VibroGym KIDS.....	84
Figura 55 Tablero eléctrico proyecto VibroGym KIDS	85
Figura 56 Diagrama de flujo - Programacion VibroGym Kids	88
Figura 57. Inicio de sesión en la página web.....	89
Figura 58 Orden para realización de levantamiento de requerimientos para software	90
Figura 59 Código diseño responsive HTML y CSS	91
Figura 60 Código inicio página web VibroGym Kids.....	92
Figura 61 Presentación del prototipo a expertos en fisioterapia	95
Figura 62 Gráfico de resultados preguntas dicotómicas encuesta de satisfacción VibroGym Kids	96

Capítulo 1

Introducción

La parálisis cerebral es una condición que afecta significativamente a la calidad de vida de los niños que la padecen. En este contexto, la investigación que aquí se presenta busca introducir un enfoque innovador y esencial para abordar uno de los desafíos más apremiantes en la terapia de estos pacientes. Se propone la concepción y la realización de un prototipo mecatrónico revolucionario, denominado "VibroGym Kids: ¡Mueve tu Poder!", diseñado con el propósito principal de optimizar la estimulación muscular en las extremidades superiores e inferiores de niños afectados por parálisis cerebral.

Este dispositivo se enfoca en la reducción controlada de la espasticidad, un síntoma común en estos pacientes que deriva de lesiones en las neuronas motoras superiores. Pero lo que hace que este prototipo sea aún más valioso es su capacidad para llevar a cabo terapias a domicilio, utilizando un entorno familiar como un gimnasio infantil y componentes vibratorios aislados. Además, este enfoque cumple rigurosamente con las especificaciones establecidas en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5663 [1], que regula las medidas de seguridad en máquinas destinadas a procedimientos terapéuticos no pasivos.

Hasta la fecha, las estrategias de tratamiento predominantes para abordar la espasticidad en pacientes con limitaciones de movilidad incluyen la administración de dosis mínimas de toxina botulínica, también conocida como Botox. Sin embargo, este enfoque ha sido controvertido en algunos casos debido a las reacciones alérgicas a la sustancia. Otra alternativa es la electroestimulación mediante chalecos equipados con electrodos que se adhieren al cuerpo del paciente. Sin embargo, este enfoque corre el riesgo de provocar desgarros musculares irreversibles, especialmente cuando la supervisión y los conocimientos adecuados son limitados.

En respuesta a estas cuestiones y guiado por la metodología de diseño mecatrónico en línea con la Metodología para la Evaluación y el Análisis de Viabilidad de Proyectos de Investigación, se ha concebido el prototipo mecatrónico denominado "VibroGym Kids: Movimiento sin Límites". Su objetivo es superar estas limitaciones, proporcionar una plataforma terapéutica que se adapte a las rutinas de los niños y así mejorar la eficacia y la seguridad en la rehabilitación.

La investigación es oportuna, ya que la parálisis cerebral es una de las condiciones neurológicas más comunes en niños, con una incidencia global de 2 a 2,5 casos por cada 1.000 nacimientos [2]. La espasticidad es un síntoma frecuente que afecta significativamente la calidad de vida de estos pacientes. A medida que la espasticidad progresa a lo largo de las etapas de la vida de los pacientes, el impacto en su movilidad y calidad de vida se vuelve más pronunciado, lo que hace que la investigación en este ámbito sea crucial.

Este trabajo no solo aspira a mejorar porcentualmente la calidad de vida de los pacientes con parálisis cerebral, sino que también tiene el potencial de abrir nuevas oportunidades comerciales y terapéuticas. La capacidad de llevar a cabo terapias en el hogar y reducir los riesgos asociados a tratamientos farmacológicos tradicionales es una perspectiva muy prometedora. Además, se podría explorar la posibilidad de combinar este enfoque con otros métodos de fisioterapia [3], [4], [5], lo que ampliará aún más el alcance y la eficacia de las terapias disponibles para una variedad de pacientes con problemas motores.

En resumen, este trabajo tiene el potencial de marcar una diferencia significativa tanto en la vida de las personas con parálisis cerebral como en el campo de la atención médica y la terapia.

Planteamiento del problema

La Parálisis Cerebral (PC), como uno de los trastornos neurológicos que afecta al desarrollo motor, se considera como una de las patologías más frecuentes en niños [1], teniendo una relevancia de 2 en 1000 [6]. Este trastorno genera un problema evidente en la postura y movimientos de la persona que lo padece causado por lesiones cerebrales que en su mayoría no son continuas; Sin embargo, el concepto de "parálisis cerebral" ha ido cambiando, no así la forma de diagnosticar esta condición, ya que se basa en la intervención clínica e información adicional (condición motora, rango de movimiento (ROM), trastorno del mismo tipo o asociado) que permiten un diagnóstico más preciso del niño. Esta enfermedad se presenta con mayor regularidad en pacientes con bajo peso al nacer, parto prematuro o trastornos placentarios en la etapa fetal o perinatal.[7]

En consecuencia, las limitaciones de cada paciente con PC infantil conllevan a diferentes alteraciones musculares y esqueléticas, entre ellas la displasia de cadera [8], que se refleja en retrasos en los indicadores de desarrollo motor que se presentan a lo largo de la infancia y que, a su vez, se evidencia por luxación de la articulación de la cadera, disminuyendo o reduciendo significativamente el Rango de Movimiento [9] (RDM) (con RDM inferior a 30°, implica riesgo para el desarrollo acetabular). La pérdida

media del RDM de los músculos de la cadera disminuye de 43° a 34° en pacientes de la primera infancia con PC y displasia de cadera [10].

La espasticidad es una alteración motriz asociada al daño a nivel moto neuronal superior [11]; según los informes, la espasticidad está presente en un porcentaje del 60% al 70% de los pacientes diagnosticados de parálisis cerebral. Se caracteriza cuando se detecta resistencia o rigidez ejercida por el músculo y aumenta cuando se estira pasivamente; la espasticidad puede aparecer de forma secundaria debido a múltiples patologías con diferentes cuadros clínicos como el daño cerebral adquirido [12], el Accidente Cerebrovascular (ACV)[13] , el derrame cerebral (ICTUS)[14], la parálisis cerebral [15], el trauma craneoencefálico [16], el trauma raquimedular [17], la esclerosis múltiple [18], las ataxias [19], [20] la displasia de cadera [21], enfermedades neurodegenerativas del sistema nervioso central [22], entre otros. La importancia del tratamiento de la espasticidad en la primera infancia radica en evitar la reducción progresiva de malformaciones óseas o contracturas localizadas en los primeros cinco años de vida [23]; aunque el paciente con PC sea tratado y la enfermedad no sea progresiva, la alteración de la espasticidad como consecuencia de la PC es progresiva, generando contracturas articulares y movimientos involuntarios anormales en los músculos espásticos del paciente que ayudan a aliviar la presión localizada.

En la actualidad, existen tratamientos farmacológicos con 'toxina botulínica' [24] y algunos tratamientos con intervención tecnológica como las terapias 'electrodos estimulantes' [25], [26] para tratar el problema de la espasticidad en niños. Cabe destacar que los efectos adversos de estos procedimientos, aunque no se presentan con frecuencia, pueden ser irreversibles y empeorar los síntomas que acompañan a la parálisis cerebral o a la patología que origina la espasticidad.

El tratamiento farmacéutico en el cual es aplicada la 'toxina botulínica' consiste en la inyección de toxinas provenientes de la bacteria *Clostridium Botulinum* [27]. A pesar de sus beneficios aparentes, es importante destacar que la toxina botulínica también conlleva riesgos significativos para la salud. Una de las principales preocupaciones asociadas con su uso es la posibilidad de que genere botulismo, una enfermedad grave que puede afectar el sistema nervioso y causar síntomas como debilidad muscular, dificultad para hablar, tragar e incluso respirar.[28]

Además del riesgo de botulismo, la aplicación de la toxina botulínica puede tener otros efectos secundarios no deseados, como la debilidad muscular excesiva o incontrolada en áreas no deseadas del cuerpo. Esto puede resultar en una apariencia facial inusual o en la pérdida de control sobre ciertos movimientos.

También es importante tener en cuenta que los efectos de la toxina botulínica son temporales y requieren aplicaciones periódicas para mantener los resultados, lo que puede generar costos y riesgos adicionales a largo plazo.[29].

En 2019, se realizó un tratamiento con Botox en 40 niños con parálisis cerebral infantil en Uruguay, lo que resultó en una disminución poco efectiva de la espasticidad, debido a que 5 de los niños experimentaron una debilidad temporal en los músculos tratados. En 2016, una mujer con distonía cervical recibió inyecciones de toxina botulínica cada 3 meses para controlar los espasmos musculares. Sin embargo, experimentó efectos adversos graves, como parálisis de la lengua y problemas respiratorios, que requirieron procedimientos quirúrgicos. Estos casos resaltan que el uso de la toxina botulínica puede afectar negativamente la calidad de vida de los pacientes, especialmente si se presentan reacciones adversas como el botulismo iatrogénico, que puede ocurrir debido a una dosis excesiva o una reacción del organismo al tratamiento.[28]

Se han desarrollado otros enfoques para el tratamiento de la espasticidad, como la electroestimulación muscular, que alivia el dolor al aplicar corriente a los músculos, bloqueando las señales de dolor al cerebro. Aunque es versátil, puede tener riesgos como desgarros musculares, quemaduras y no es adecuada para ciertos pacientes, como aquellos con problemas emocionales, marcapasos, tejidos lesionados, o condiciones cardíacas y neurológicas. La falta de pruebas previas puede llevar a lesiones musculares o problemas renales graves, como la rabdomiólisis.[30]

Teniendo en cuenta la problemática anterior y considerando como principal preocupación apoyar el proceso de tratamiento a la espasticidad en personas de primera infancia, se propone desarrollar un enfoque terapéutico mecatrónico basado en la vibroterapia para mitigar la espasticidad en niños con parálisis cerebral. Este proyecto busca abordar la problemática existente, ofreciendo una solución efectiva y segura para reducir la espasticidad y mejorar la calidad de vida de los pacientes en su etapa de desarrollo inicial. Para ello, se decidió plantear la siguiente pregunta de investigación: **¿Cómo se puede contribuir a reducir el grado de espasticidad de los niños en su etapa infantil mediante la creación de una solución mecatrónica basada en la vibroterapia?**

Justificación

El enfoque central de esta investigación se orienta hacia la concepción y el desarrollo de un dispositivo fisioterapéutico que utiliza un sistema vibratorio. Este prototipo se propone como una perspectiva viable y eficiente para abordar la espasticidad en niños con parálisis cerebral. Es imperativo destacar que el manejo de la espasticidad es un asunto de trascendental importancia para viabilizar terapias que reduzcan el dolor y contribuyan a mejorar paulatinamente la calidad de vida de los pacientes con dificultades neuromotoras.

En este contexto, se centra en el control de la amplitud de movimiento y la postura adecuada, estableciendo parámetros de referencia que van de 0 a 2 en la escala de

Ashworth para los movimientos de flexión. Este enfoque se complementa con la aplicación del método Bobath, que se basa en la estimulación del sistema nervioso central y se materializa a través de la regulación postural mediante dispositivos de fácil manipulación [31].

Actualmente, los tratamientos para atenuar la espasticidad en Colombia se basan principalmente en enfoques farmacológicos, que consisten en la aplicación de toxina botulínica a través de inyecciones dirigidas a los músculos afectados por la patología. Sin embargo, el uso recurrente de esta sustancia ha dado lugar a un preocupante problema de salud y seguridad. La aparición de botulismo iatrogénico tras la administración de Botox aumenta el riesgo de mortalidad de los pacientes debido a la acción de una toxina que ataca los componentes nerviosos del organismo. Los síntomas asociados a esta afección amenazan la integridad vital del paciente [32].

Dadas estas circunstancias, la presente investigación pretende no sólo desarrollar un dispositivo alternativo práctico para el manejo de la espasticidad, sino también mitigar los riesgos asociados a los tratamientos farmacológicos actuales, allanando así el camino para una modalidad terapéutica más segura y eficaz para los niños con parálisis cerebral [29].

Es conveniente saber que la parálisis cerebral es la causa más frecuente de discapacidad motora en niños, con una incidencia global de 2 a 2,5 casos por cada 1.000 nacimientos [33]. La espasticidad es la secuela neurológica más frecuente, y afecta significativamente a la calidad de vida. Se definió por primera vez en 1980 como un aumento intrínseco de la resistencia muscular dependiente de la velocidad del reflejo tónico de estiramiento al movimiento pasivo de una extremidad en personas con síndrome de neurona motora superior [17], [34], [35], [36]. Este trastorno implica al cerebro, afectando a funciones del sistema nervioso como el movimiento, y esto, a su vez, provoca alteraciones del tono muscular debido a la falta prolongada de movimiento, lo que conduce a la espasticidad. Debe entenderse que la espasticidad progresa en cuatro fases: La fase espástica o fase inicial (caracterizada por un aumento del tono muscular colateral al reflejo miotático), la fase de actitud vigorosa o fase secundaria (predominan los músculos flexores sobre los aductores y se genera un desequilibrio muscular), la fase de retracción muscular o tercera fase (se evidencia un crecimiento desigual de los músculos agonistas y antagonistas con una resistencia a descontracturarse) y finalmente la fase de deformidades osteoarticulares, donde el paciente presenta calambres musculares persistentes y dolor, siendo esta última una limitación para soportar las sesiones fisioterapéuticas comúnmente conocidas [37], [38]. La presente investigación se enfocará en el estudio de la vibroterapia en el tratamiento de la espasticidad, enfocada en las fases 1 y 2 de este trastorno motor, permitiendo mostrar una nueva estrategia de terapia con un gimnasio de rehabilitación pasiva combinada con elementos vibratorios que pretenden aminorar el avance de la espasticidad en el niño y permitir la evolución de las terapias físicas sin tanto dolor al realizar movimientos flectores.

Desde una perspectiva social, este planteamiento beneficia a las familias que cuidan de personas afectadas por parálisis cerebral. Además de su claro valor terapéutico, esta innovación podría traducirse en un alivio económico y proporciona seguridad durante su aplicación. Esto se refleja en la capacidad de facilitar la ejecución de diversas estrategias fisioterapéuticas en el hogar, especialmente para aquellos pacientes cuya movilidad se ve dificultada para acceder a los centros médicos.

En el plano empresarial, este proyecto podría dar lugar a varias oportunidades comerciales emergentes. Una de ellas es la creación de un servicio nacional de fisioterapeutas que presten atención directa en los domicilios de pacientes vulnerables, tanto en zonas urbanas como rurales. Este servicio sería una alternativa muy pertinente a los métodos convencionales de fisioterapia, principalmente a través de dispositivos tradicionales.

En el futuro, se podría explorar la posibilidad de combinar estos enfoques con otros métodos de fisioterapia para ayudar a una variedad de pacientes con problemas motores. Esto no solo ampliará el alcance de quienes pueden beneficiarse, sino que también enriquecería las opciones terapéuticas disponibles. En resumen, este trabajo tiene el potencial de hacer una diferencia importante tanto en la vida de las personas con parálisis cerebral como en la promoción de nuevas oportunidades en el campo de la atención médica.

Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Desarrollar un prototipo tecnológico basado en vibroterapia muscular orientado a apoyar las terapias físicas en el tratamiento de la espasticidad en la primera infancia.

1.1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las diversas estrategias terapéuticas destinadas a mejorar los niveles de parálisis cerebral espástica implementadas en la primera infancia.
- Implementar un prototipo funcional y modular basado en la generación controlada de vibraciones para la población infantil con patología de parálisis cerebral espástica.
- Validar el dispositivo desarrollado mediante un estudio de caso en un contexto real con expertos en la patología de parálisis cerebral espástica teniendo como punto focal las extremidades y uniones miotendinosas.

Marco teórico y conceptual

En este segmento se hablará de temas relacionados con la espasticidad, parálisis cerebral, diagnóstico, tratamientos, entre otros. Enmarca de manera general información relevante que delimita la población objeto de la investigación y algunos métodos de tratamiento alternativos no invasivos.

Conceptos relacionados con PCI:

Parálisis cerebral

Parálisis cerebral es un término que define una serie de trastornos motores de origen cerebral, no progresivos que constituyen la causa más frecuente de discapacidad motora en la infancia. No obstante, al ser una denominación antigua, no ha perdido vigencia ni valor si se le utiliza como término sindromático que supone un estudio etiológico acucioso y una conducta terapéutica que incluye múltiples áreas de intervención y de especialistas coordinados a fin de lograr la máxima funcionalidad posible del niño desde el punto de vista motor, intelectual, de comunicación y la máxima integración social [39].



**Figura 1. Día Mundial de la Parálisis Cerebral Infantil.
Fuente: [40]**

Esta engloba a un gran número de síndromes neurológicos clínicos, de etiología diversa. Estos síndromes se caracterizan por tener una sintomatología común **Figura 1** los trastornos motores. Algunos autores prefieren manejar términos como

“encefalopatía fija”, “encefalopatías no evolutivas”. Se mencionan la utilidad de programas de intervención temprana y métodos especiales de rehabilitación, así como el manejo de las deficiencias asociadas como la epilepsia, deficiencia mental, trastornos del lenguaje, audición, visión, déficit de la atención que empeoran el pronóstico de manera significativa. El pronóstico también depende de la gravedad del padecimiento y de las manifestaciones asociadas [41]

Parálisis cerebral espástica

La parálisis cerebral espástica puede ser leve o grave **Figura 2** Depende de la cantidad de cerebro afectado. Por ejemplo, un niño con parálisis cerebral espástica leve puede tener rigidez en un solo brazo. Sin embargo, es posible que los niños con parálisis cerebral espástica grave no puedan mover todos los músculos. Es posible que necesiten ayuda para comer y/o usar una silla de ruedas para moverse. [42]

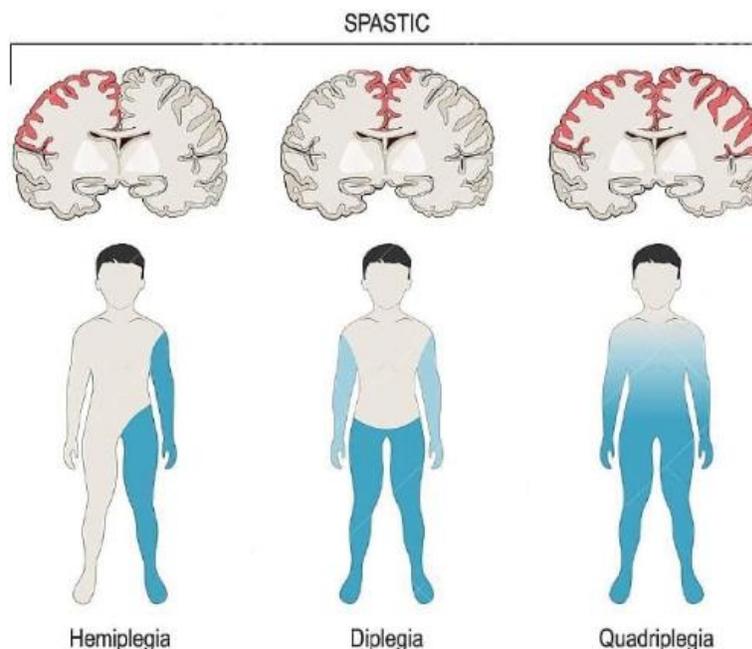


Figura 2 Grados de espasticidad según hemisferio afectado

Fuente: Centro Traumatológico

Vibroterapia

Consiste en la aplicación terapéutica de vibraciones mecánicas. Se trata de la aplicación, en determinadas partes del cuerpo, de una fuente de vibración, que puede ser manual, pero habitualmente proviene de una fuente electromecánica, accionada fundamentalmente por pequeños motores. En esencia, la vibración produce drenaje y arrastre de líquidos, hace circular mejor la sangre, la linfa y los líquidos intersticiales y favorece la expulsión de toxinas.[43]

Nervios motores

METODOLOGÍA

Los nervios motores **Figura 3** son los que salen de la médula espinal y que posteriormente se dirigen hacia los músculos esqueléticos y lisos, por lo que además son llamados nervios eferentes. Lo que indica que sólo envían información que proviene de los centros superiores para luego ser dirigido hacia su lugar de destino.[44]

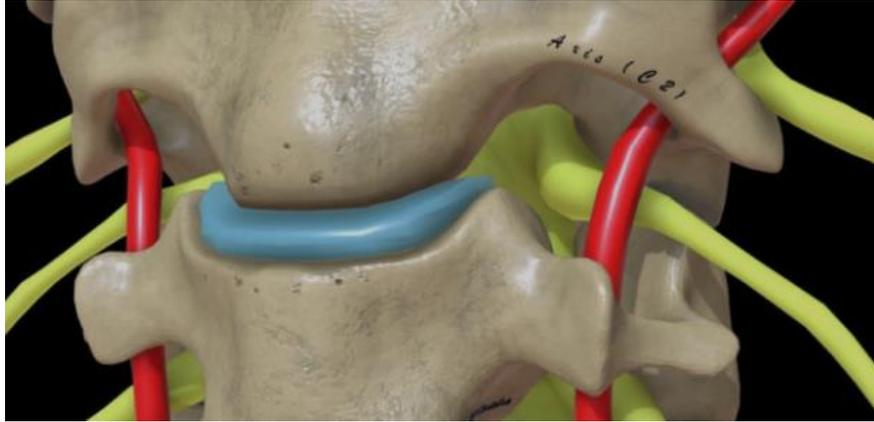


Figura 3. Raíces nerviosas de la médula espinal

Fuente: Homo Medius

Primera infancia

La "primera infancia" **Figura 4** se refiere a la etapa temprana del desarrollo humano, que abarca desde el nacimiento hasta los aproximadamente seis años de edad. Durante este período crítico, los niños experimentan un crecimiento y desarrollo significativos en áreas físicas, cognitivas, sociales y emocionales. Es una fase en la que los cimientos fundamentales para la salud, el aprendizaje y el bienestar a lo largo de la vida se establecen.



Figura 4. Desarrollo motor en la primera infancia.

Fuente: Pollywo family

Durante la primera infancia, los niños experimentan rápidos cambios físicos y cognitivos. Sus habilidades motoras, como gatear, caminar y correr, evolucionan, al igual que su capacidad para comunicarse y comprender el mundo que les rodea. Esta etapa también es crucial para la formación de conexiones cerebrales esenciales que influyen en el aprendizaje, la memoria y la resolución de problemas en el futuro. La interacción con los cuidadores y el entorno desempeña un papel fundamental en el desarrollo de los niños durante la primera infancia. Las experiencias positivas y enriquecedoras en esta etapa pueden tener un impacto duradero en la salud mental, emocional y social, así como en la capacidad de establecer relaciones saludables y en el logro académico posterior en la vida. Por lo tanto, proporcionar un entorno de apoyo y oportunidades de aprendizaje adecuadas durante la primera infancia es esencial para asegurar un desarrollo saludable y un futuro próspero para los niños [45].

Conceptos relacionados con miembros inferiores

Displasia de cadera

Displasia de cadera **Figura 5** es el término médico que se utiliza para indicar todas las deformidades que presenta la cadera en la etapa de crecimiento ya sea en el acetábulo, fémur o ambos. Esto causa que la articulación de la cadera se disloque total o parcialmente. La mayoría de las personas con displasia de cadera nacen con esta afección [46]



Figura 5. Displasia debido a articulación inestable

Fuente: [47]

Espasticidad muscular

La espasticidad muscular **Figura 6** es un problema frecuente con trastornos neurológicos crónicos, como resultado de lesión de la neurona motora superior, aunque el incremento del tono muscular en estos pacientes puede resultar en un deterioro de los movimientos voluntarios y por lo tanto interferir en la función motora.

METODOLOGÍA

Sin embargo, a menudo la espasticidad es útil para mantener la postura del tronco, y la carga de peso de la extremidad inferior débil cuando se realiza la marcha. El conocimiento de la espasticidad, su fisiología, su fisiopatología, los efectos a corto y largo plazo, así como la función a nivel espinal y nivel muscular son necesarias para proporcionar un tratamiento integral que permita prevenir y agravar el efecto sobre la función motora, los espasmos dolorosos y las contracturas fijas osteoarticulares, que incapaciten el confort para estar sentado o acostado. [48]



Figura 6. Espasticidad muscular
Fuente: [49]

Uniones miotendinosas

Las uniones miotendinosas son regiones especializadas donde las fibras musculares se unen a las fibras de colágeno del tendón, en las que las fuerzas son transmitidas entre las miofibrillas y la matriz extracelular. La zona de transición que abarca la UM cubre una longitud de 100 a 200 μm . Evidentemente se trata de una zona especializada de la fibra muscular que requiere de una estabilidad estructural extrema, lo que determina sus características microscópicas. [50]

Conceptos relacionados con sensibilidad muscular

Sensibilidad superficial

La sensibilidad superficial se transmite de los órganos correspondientes de la piel o papilas a unas primeras neuronas, cuyas células se encuentran en los ganglios de las raíces posteriores de los nervios medulares. Al penetrar a la médula espinal, las fibras

se subdividen así: las que conducen las sensibilidades dolorosa y térmica y parte de la táctil hacen sinapsis en los cuernos posteriores con una segunda neurona sensitiva, que cruza la médula y va hasta el tálamo, integrado por tres núcleos voluminosos de sustancia gris: uno interno, otro externo y un tercero medio anterior, los cuales limitan lateralmente con el ventrículo medio y forman el piso de los laterales [51]

Reflejo miotático

El "reflejo miotático", también conocido como reflejo de estiramiento muscular o reflejo de estiramiento monosináptico, es un mecanismo neurológico involuntario que ocurre en respuesta a un estiramiento rápido y súbito de un músculo. Este reflejo está mediado por las fibras sensoriales llamadas husos neuromusculares, que se encuentran incrustadas en el tejido muscular.

Cuando un músculo es estirado rápidamente, las fibras del huso neuromuscular detectan este cambio en la longitud muscular y envían señales a través de fibras nerviosas sensoriales hacia la médula espinal. En la médula espinal, estas señales activan directamente las neuronas motoras del mismo músculo, provocando una contracción muscular rápida y automática en respuesta al estiramiento.

El reflejo miotático tiene un propósito funcional importante en el control del tono muscular y en la regulación de la longitud de los músculos. Actúa como un mecanismo de protección para prevenir estiramientos excesivos o daños musculares. Además, este reflejo contribuye al mantenimiento del equilibrio y la postura corporal al ajustar rápidamente la tensión muscular en respuesta a cambios repentinos en la longitud del músculo. Este reflejo es una manifestación básica de la interacción entre el sistema nervioso y el sistema musculoesquelético, y su integridad es evaluada en el examen neurológico para valorar la función neuromuscular en pacientes [52].

Rango de movimiento

El "rango de movimiento" **Figura 7** en fisioterapia se refiere al grado completo de movimiento que puede lograr una articulación específica en una dirección particular. En otras palabras, es la amplitud de movimiento que una articulación en particular puede experimentar desde su posición más extendida hasta su posición más flexionada, o viceversa, en una dirección específica. Este concepto es fundamental en la evaluación y tratamiento de las condiciones musculoesqueléticas y neuromotoras, ya que proporciona información sobre la flexibilidad, la movilidad y la funcionalidad de una articulación y de los músculos y tejidos circundantes.

Los fisioterapeutas utilizan mediciones precisas del rango de movimiento para evaluar las restricciones o limitaciones en las articulaciones de un paciente. Esto les permite determinar la presencia de problemas como contracturas musculares, rigidez articular,

METODOLOGÍA

inflamación o lesiones que podrían estar afectando la capacidad normal de movimiento de una persona. Además, el rango de movimiento también se utiliza como referencia para establecer objetivos terapéuticos y para medir el progreso del tratamiento a lo largo del tiempo.

En el proceso de tratamiento, los fisioterapeutas emplean diversas técnicas y ejercicios para mejorar, mantener o restaurar el rango de movimiento en las articulaciones afectadas. Esto puede incluir estiramientos, ejercicios de movilización, terapia manual y otras intervenciones específicas para cada paciente. El objetivo final es permitir que el paciente recupere o alcance un rango de movimiento funcional que le permita realizar actividades diarias y funcionales con mayor facilidad y sin dolor.[53]

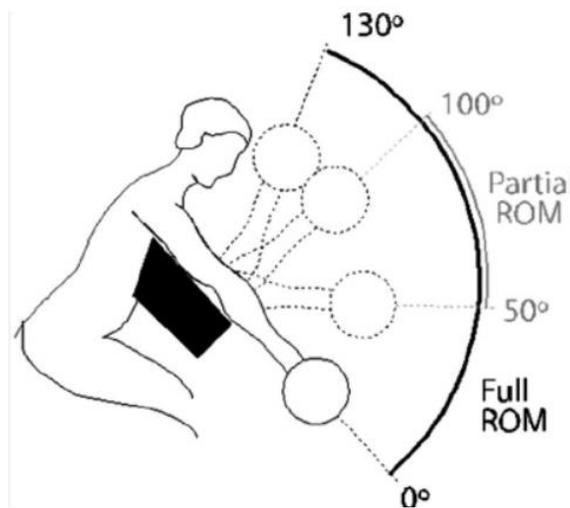


Figura 7. Curvas de resistencia

Fuente: [54]

Conceptos relacionados con metodologías para terapias neuromotoras

Método Bobath

Este método se basa en la comprensión profunda de la neurofisiología y la biomecánica, así como en la interacción entre el sistema nervioso y el sistema musculoesquelético. Su enfoque principal es mejorar la funcionalidad y la calidad de vida de los pacientes al fomentar una mejor organización del movimiento y la postura. El Método Bobath se adapta a las necesidades individuales de cada paciente, considerando sus capacidades, limitaciones y objetivos terapéuticos.

La Terapia Bobath implica una evaluación exhaustiva de la movilidad, el tono muscular, la postura y el equilibrio del paciente. A partir de esta evaluación, los terapeutas Bobath diseñan intervenciones personalizadas que incluyen técnicas de facilitación y manejo

manual para guiar el movimiento y el control motor del paciente. Se enfoca en normalizar el tono muscular, mejorar la coordinación y facilitar patrones de movimiento más funcionales.

Un aspecto fundamental del Método Bobath es la incorporación activa del paciente en su proceso de rehabilitación. Se busca que el paciente participe activamente en las actividades terapéuticas, lo que puede involucrar ejercicios específicos, entrenamiento de habilidades funcionales y estrategias para mejorar la independencia en la vida cotidiana.[3]

Escala Ashworth

La "Escala Ashworth" es una herramienta de evaluación clínica utilizada para medir el tono muscular y la espasticidad en pacientes con trastornos neuromusculares, como parálisis cerebral, lesiones cerebrales y enfermedades neurológicas. Esta escala se utiliza para determinar el grado de resistencia que se experimenta al mover pasivamente una articulación a través de su rango de movimiento. La Escala Ashworth consiste en una clasificación numérica que va desde 0 hasta 4 o 5, dependiendo de la versión utilizada. Cada nivel en la escala representa diferentes grados de espasticidad y resistencia muscular [55]

Antecedentes

Dentro del dominio de la investigación literaria en relación a la vibroterapia para la rehabilitación motriz, es pertinente destacar ciertas contribuciones en la literatura científica.

En individuos que padecen esclerosis múltiple (EM), los problemas principales comprenden trastornos en la postura, deterioro funcional y fatiga. Como alternativa terapéutica a nivel neurológico, se está investigando el uso de la vibración de cuerpo completo (WBV), la cual administra estímulos mecánicos. Este estudio explora los efectos del WBV en el control postural, el equilibrio, la funcionalidad y la fatiga en 34 pacientes con EM en etapas leves a moderadas. Estos pacientes se dividieron aleatoriamente en grupos de intervención y control. El grupo de intervención recibió 5 sesiones diarias de WBV durante 5 días a una frecuencia de 6 Hz, cada sesión con una duración de 1 minuto. Se realizaron evaluaciones antes y después de la intervención mediante pruebas de posturografía, test de control motor, pruebas de equilibrio y mediciones de fatiga a través de escalas. Los resultados indicaron mejoras en el grupo de intervención, particularmente en la latencia de los test de control motor. Al comparar los resultados entre los grupos, solo se observaron mejoras significativas en la latencia del test de control motor en el grupo de intervención. Además, no se registraron efectos adversos durante el estudio. Basándose en este estudio piloto, se sugiere que la WBV podría contribuir a una mejora a corto plazo en la capacidad de

METODOLOGÍA

recuperar la postura en situaciones de desequilibrio repentino. Esto podría convertir a la WBV en una herramienta terapéutica valiosa para abordar el equilibrio y la postura en pacientes que sufren de EM [56].

[Gupta et al., 2019]

Un estudio reciente evaluó el impacto de la vibración de cuerpo completo (VCF) en la espasticidad del cuádriceps en personas con hipertonia espástica debido a lesiones de médula espinal (LME). El estudio incluyó a 16 participantes que fueron asignados aleatoriamente a dos grupos: uno que recibió VCF y otro de control. Ambos grupos recibieron tratamientos durante 12 semanas.

Los participantes del grupo de VCF experimentaron una disminución significativa en la espasticidad del cuádriceps después de las sesiones de VCF, y este efecto se mantuvo durante al menos ocho días. La reducción fue más evidente en la evaluación a largo plazo después de las sesiones que en la evaluación inmediata. Los efectos de la VCF en la espasticidad fueron similares tanto en los participantes que tomaban medicación anti espástica como en los que no la tomaban. Estos resultados sugieren que la VCF podría ser un complemento útil en el tratamiento de la espasticidad en personas con LME. La VCF parece ser efectiva al disminuir la actividad refleja en los músculos cuádriceps [57].

[Aquino et al., 2018]

Un estudio reciente evaluó los efectos de la vibración muscular focal (FV) en la función motora de las extremidades superiores en pacientes en etapas subagudas de un accidente cerebrovascular. El estudio incluyó a 29 pacientes que fueron asignados aleatoriamente a dos grupos: uno que recibió FV y otro de control. Ambos grupos recibieron tratamientos durante 4 semanas. El grupo de FV experimentó mejoras significativas en medidas de función motora y plasticidad cerebral. Los pacientes del grupo de FV mostraron una mejoría en la fuerza muscular, la amplitud del movimiento, la destreza y la coordinación. También mostraron cambios en la corteza sensoriomotora, lo que indica que la FV puede estar promoviendo la plasticidad cerebral. Estos resultados sugieren que la FV puede ser un tratamiento eficaz para mejorar la función motora en pacientes con accidente cerebrovascular subagudo. La FV parece ser efectiva al mejorar la eficacia de las vías sensoriales y causar cambios en la corteza sensoriomotora [32].

En el campo de la investigación literaria sobre los efectos adversos de la toxina botulínica en la rehabilitación motriz, es relevante resaltar algunas aportaciones presentes en la literatura científica.

[Yiannakopoulou et al., 2023]

Las toxinas botulínicas están entre los venenos más poderosos identificados en seres humanos, con una dosis letal de alrededor de 1 ng por cada kilogramo de masa corporal. Existen siete variaciones únicas de estas toxinas, de las cuales la cepa A es la más potente. Hace aproximadamente dos siglos, Justinus Andreas Christian Kerner observó los efectos de la toxina botulínica en los músculos del esqueleto y en la función parasimpática, marcando el comienzo de su uso con fines terapéuticos. Con el tiempo, su aplicación se ha ampliado de manera continua. En 1979, se aprobó su empleo para tratar el estrabismo, y casi dos décadas atrás, se empezó a usar en casos de espasmo hemifacial, estrabismo y blefaroespasma. En 1990, la Conferencia de Consenso de los Institutos Nacionales de Salud la reconoció como una terapia eficaz y segura para diversas afecciones, incluyendo la distonía espasmódica, entre otras. Además, desde la autorización de la Administración de Alimentos y Medicamentos de los EE. UU. (FDA) en 2002 para tratar arrugas en la frente, se ha convertido en el procedimiento estético más popular.

A pesar de ser considerada en general segura, el uso extendido y las cada vez más variadas aplicaciones de la toxina botulínica han generado inquietudes sobre su seguridad. El propósito de este artículo es examinar los efectos negativos graves y duraderos que podrían surgir del empleo terapéutico y estético de esta toxina [58]. El propósito de este artículo es examinar los efectos negativos graves y duraderos que podrían surgir del empleo terapéutico y estético de esta toxina [58]

[Young et al., 2023]

La toxina botulínica se utiliza extensamente para abordar distonías laríngeas como la disfonía espasmódica. Se ha empleado durante décadas en una variedad de contextos neurológicos y estéticos. A pesar de su comprobada eficacia y la presencia de reducidos efectos secundarios en la mayoría de los pacientes, existe un riesgo alto de efectos adversos graves que podrían aparecer días o semanas después de la aplicación, incluyendo síntomas como disfonía, problemas respiratorios y debilidad muscular. La piridostigmina, un inhibidor reversible de la acetilcolinesterasa aprobado para tratar la miastenia gravis, se ha considerado como una posible manera de contrarrestar los efectos de la toxina botulínica en la unión neuromuscular. Algunos casos observados en una institución médica indican que pacientes que experimentaron reacciones graves a la terapia con toxina botulínica experimentaron mejoras notables en sus síntomas después de recibir tratamiento con piridostigmina [59].[59]

METODOLOGÍA

Metodología

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizaron múltiples referentes desde el ámbito académico y desde los dispositivos especializados para la rehabilitación de la parálisis cerebral espástica en la primera infancia. Con el fin de lograr los objetivos delineados en el proyecto titulado "Desarrollo de un prototipo de estimulación muscular para mitigar la espasticidad en niños con parálisis cerebral mediante vibroterapia", se emplea una adaptación del método científico delineado por Mario Bunge [60] En paralelo, el proceso de construcción del prototipo sigue las etapas delineadas en la metodología de diseño mecatrónico [61]. Ahora bien, respecto a los dispositivos especializados se utilizó como base la propuesta denominada "Gym Smile - Rehabilitación en Casa" [62].

Fase 1: Planteamiento del problema

En esta etapa se implementa la propuesta presentada por "Gym Smile - Rehabilitación en Casa", la cual se fundamenta en la utilización de un dispositivo concebido para la rehabilitación domiciliaria. Dicho dispositivo se configura con el propósito de atender la problemática asociada a la movilidad requerida para la ejecución de ejercicios pasivos en el entorno residencial. A continuación, se enumeran las actividades primordiales correspondientes a esta fase:

- **Identificación de los acontecimientos:** Clasificación y elección de los eventos relevantes.
- **Identificación del problema:** Identificación de una carencia o ausencia. Investigación de las bases teóricas relacionadas con terapias para el favorecimiento de la espasticidad en primera infancia.
- **Definición del problema:** Presentación de una pregunta, condensación del problema a su núcleo esencial.

Resultado esperado: Planteamiento del problema, cuestión central y revisión de la documentación existente.

Fase 2: Construcción del modelo teórico

En esta fase, con la utilización de la metodología de diseño mecatrónico, la cual define las directrices primordiales para la creación del prototipo funcional permitiendo una sinergia optimizada en diversos campos de aplicación. Las etapas de esta fase se presentan de manera detallada a continuación:

- Análisis y selección de variables relevantes: Investigación de los dispositivos orientados a la asistencia en la rehabilitación de individuos de primera infancia con parálisis cerebral.
- Estrategias de identificación: Evaluación y elección de las distintas tecnologías que se pueden aplicar en el contexto del problema.
- Creación del prototipo propuesto.

Resultado esperado: Informe que comprende la caracterización de los diversos dispositivos contribuyentes al proceso de rehabilitación pasiva, junto con la concepción y materialización del prototipo sugerido.

Fase 3: Validación del dispositivo propuesto

En esta fase se aplican ciertas pautas delineadas en la metodología global de validación, las cuales dirigen la elaboración del ensayo de viabilidad conceptual.

- Indagación de respaldos: Inferencia de implicaciones específicas que pudieran haber sido comprobadas en proyectos de naturaleza similar.
- Formulación de pronósticos o resultados anticipados al llevar a cabo el dispositivo propuesto.
- Diseño y planificación del ensayo de viabilidad conceptual: Delimitación de objetivos, suposiciones y los recursos y métodos empleados para la realización del análisis de caso.
- Ejecución del ensayo de viabilidad conceptual: Confirmación de la validez del prototipo propuesto.

Resultado esperado: Informe técnico que abarca las implicaciones comprobables, así como las proyecciones de resultados, junto con el informe técnico que documenta la ejecución del ensayo de viabilidad conceptual.

Fase 4: Introducción de las conclusiones en la teoría

- Comparación de los resultados obtenidos con las predicciones anticipadas.
- Modificaciones al prototipo propuesto: Evaluación de los resultados y adaptaciones requeridas.

Capítulo 2.

Análisis Bibliométrico sobre los tratamientos relacionados con la espasticidad en niños

Un análisis bibliométrico es un enfoque cuantitativo y estadístico que se utiliza para evaluar y estudiar las características y tendencias de la producción bibliográfica y la difusión de la información en un campo específico. Esta metodología implica el procesamiento de metadatos relacionados con la literatura científica y académica, lo que incluye la recopilación y el análisis de información sobre publicaciones, autores, citas y otros indicadores bibliográficos. Este tipo de estudios utilizan métricas y técnicas específicas para cuantificar y examinar patrones de publicación, colaboración entre autores, difusión de conocimiento y la influencia de las publicaciones y los autores en un campo de estudio [63]. En esta sección, se presenta un análisis bibliométrico relacionado con la incidencia de la espasticidad y la parálisis cerebral para caracterizar las diversas estrategias terapéuticas dirigidas a mejorar los niveles de parálisis cerebral espástica implementadas en la primera infancia.

La información detallada se deriva de una estrategia de búsqueda, basada en las temáticas fundamentales de este proyecto (Espasticidad, Parálisis cerebral, Primera infancia) y las soluciones convencionales no invasivas, incluyendo la propuesta de vibroterapia centrada en la rehabilitación terapéutica. Este análisis bibliométrico abarca elementos como la identificación de autores destacados, la participación de instituciones académicas, la producción científica segmentada por países y la colaboración internacional.

Para llevar a cabo este análisis, se emplearon bases de datos bibliográficas y recursos digitales como Scopus, con el fin de adquirir artículos y proyectos de índole científica. Este proceso arrojó un total de 8.636 artículos, los cuales se sometieron a un proceso cribado de metadatos mediante el software R Studio, lo que permitió llevar a cabo un análisis bibliométrico haciendo uso de la librería Bibliometrix. Como elemento

direccionador se utilizó la metodología propuesta por Donthu que sirve para guiar este tipo de estudios [64]

2.1. Recopilación de información

La recopilación de información se llevó a cabo a través de una cadena de búsqueda con el propósito de identificar documentos científicos utilizando operadores de búsqueda parametrizados. La metodología PICO [65] se empleó como guía para identificar términos que facilitarían la búsqueda de estudios pertinentes. Una vez que se identificaron los conceptos y términos clave que direccionan la investigación, se utilizaron operadores booleanos "AND" y "OR" para combinar y conceptualizar estos términos lo que permitió la creación de la cadena de búsqueda, como se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Cadena de búsqueda aplicada sobre Scopus

("cerebral palsy" OR "muscle spasticity" OR "hemiplegia" OR "quadriplegia" OR "diplegia" OR "spasticity") AND ("botulinum toxin" OR "occupational therapy" OR "physical therapy" OR "bracing" OR "oral medications" OR "casting" OR "applications" OR "physiotherapy" OR "electroshock" OR "electrostimulation" OR "botox" OR "vibrotherapy" OR "device") AND ("child" OR "children" OR "early childhood" OR "infant" OR "minor" OR "girl")

La cadena de búsqueda se secciona en tres partes principales; la primera sección se enfoca en la problemática siendo esta la espasticidad asociada a la parálisis cerebral, la segunda sección de la cadena está relacionada a las soluciones o tratamientos específicos que se han usado a través de los años de investigación, por último, se aborda la población objetivo, la cual es la primera infancia y todos los sinónimos relacionados a esta etapa.

Para la ejecución de la búsqueda **Figura 8**, se introduce la cadena desarrollada con los distintos términos en inglés en la base de datos Scopus, ejecutando la búsqueda en el resumen, los títulos de los documentos y las palabras claves. Una vez la base de datos encuentra todos los artículos y publicaciones que cumplen con los condicionales

ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

de la cadena de búsqueda, se procede a filtrar el año desde 1950 hasta la fecha actual (24/10/2023) para un total de 8.636 artículos. Posteriormente, se procede a seleccionar todos los elementos encontrados para exportarlos en formato CSV (valores separados por coma) [66] para finalmente cargarlos en Rstudio y realizar su debido análisis bibliométrico

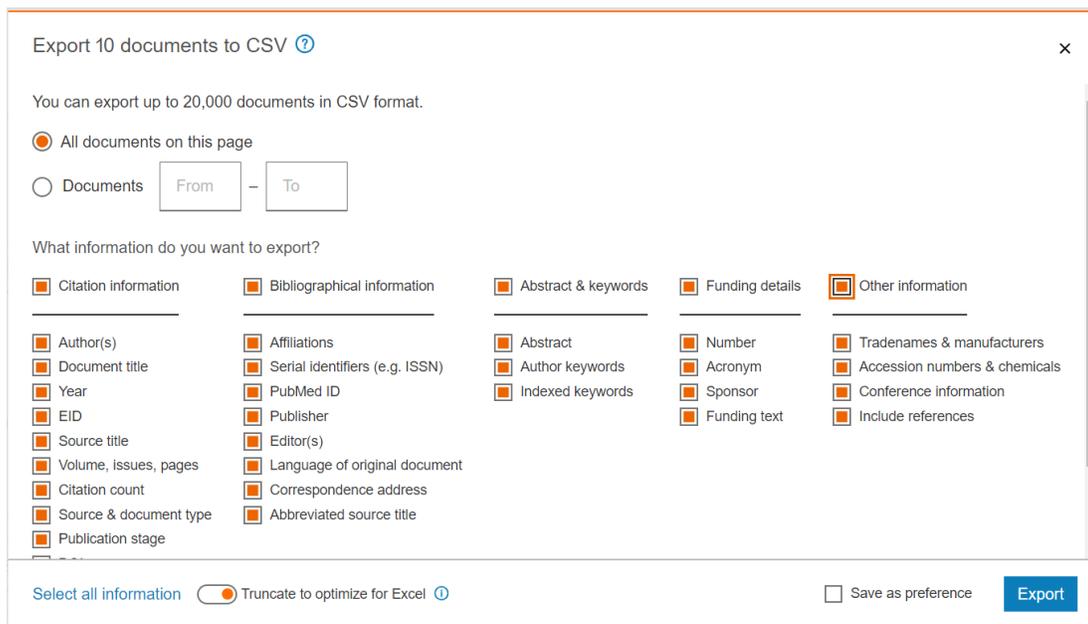


Figura 8. Filtro exportar CSV
Fuente: Autores

2.2. Resultados y análisis de resultados

A continuación, se exponen los resultados obtenidos del análisis bibliométrico los cuales permiten evidenciar de forma gráfica, los principales autores y su correlación con la problemática tratada, así mismo, la cooperación investigativa y producción internacional, los conceptos más utilizados en el área y publicaciones por afiliaciones universitarias. Esta información corrobora que la espasticidad en enfermedades como la parálisis cerebral, es considerada una problemática mundial, la cual ha sido caso de estudio desde 1950 y a la fecha sigue teniendo relevancia en investigaciones médicas con contribución multidisciplinaria.

2.3. Información general del análisis bibliométrico

La información estadística derivada del análisis bibliométrico **Figura 9** revela una colaboración científica mantenida a lo largo de aproximadamente 73 años, desde 1951 hasta 2023. Durante este periodo, se han publicado 464 fuentes de información producidas en el ámbito. Además, se ha producido un incremento medio anual de las publicaciones del 8,53%, con una destacada participación de 24.504 autores, principalmente trabajadores de las ciencias de la salud. Esto refleja un interés constante por el área temática, y fruto de esta colaboración se han generado un total de 196.128 referencias con una importante presencia de la cooperación internacional.



Figura 9. Información principal estadística

Fuente: Bibliometrix

Otro aspecto importante de este análisis es el porcentaje de tasa de crecimiento anual, el cual al compararse con la segunda enfermedad o trastorno de movimiento que más afecta a la población infantil llamada “Distonía”, permite entender la relevancia de la parálisis cerebral como campo de estudio para mejorar la calidad de vida de los niños,

2.4. Producción científica anual

En la producción científica anual **Figura 10**, se observa un crecimiento gradual con algunos años de variaciones en la producción, de alta y baja de manera secuencial. En el contexto de la producción científica, se destaca un aspecto importante en este estudio. Entre 1990 y principios de la década de 2000, la producción se mantuvo en un rango de 2 a 7 publicaciones por año, siendo 7 el máximo número de publicaciones. A partir de 2001 hasta 2010, tanto los estudios como las publicaciones experimentaron un aumento, lo cual fue congruente con el incremento a nivel mundial en la incidencia de parálisis cerebral en niños y adultos [67]. Esta preocupación continuó creciendo de

ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

manera sostenida, resultando en un número anual de publicaciones científicas que supera los 300 como se observa en la figura 9.

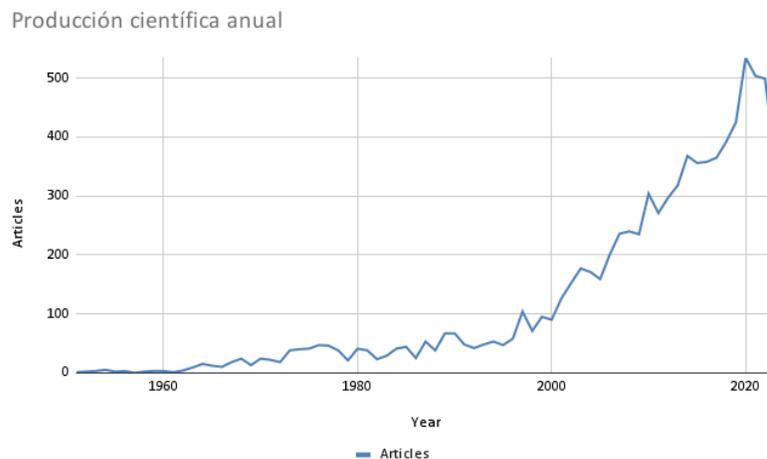


Figura 10. Producción científica anual
Fuente: Bibliometrix

2.5. Autores destacados del campo

La **Figura 11** representa la producción académica de autores muy influyentes a lo largo del tiempo en un dominio de estudio. Destaca una colaboración continua y significativa que abarca el periodo de 1997 a 2018, protagonizada por Kerr Graham, distinguida por la publicación de tres artículos en 2001, 2008 y 2018. También es esencial destacar la constante contribución del investigador irlandés Desloovere K, que ha mantenido una secuencia ininterrumpida de publicaciones desde 1999 hasta la fecha centradas en la parálisis cerebral. Asimismo, el científico británico Molenaers G. ha presentado un patrón de publicación similar durante el mismo periodo, manteniendo una destacada colaboración en este campo de estudio.

Documents by author

Compare the document counts for up to 15 authors.

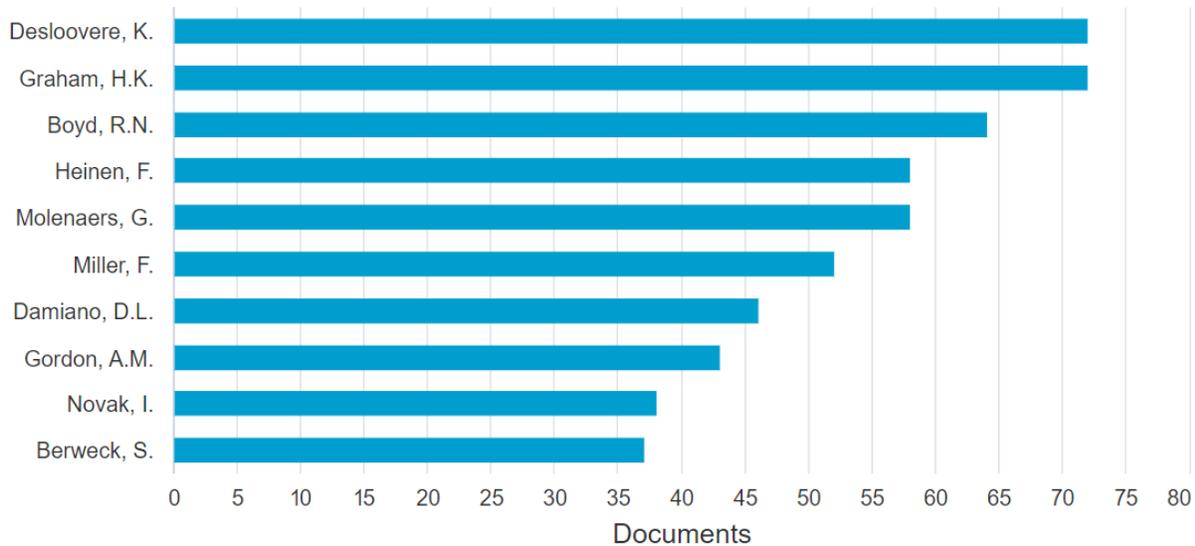


Figura 11. Producción autores destacados

Fuente: Scopus

2.6. Afiliación producción universitaria

En relación con las afiliaciones universitarias **Figura 12**, se observa que los dos continentes que más participan en las afiliaciones son Australia y Norteamérica, generando respectivamente ± 150 y ± 125 artículos por universidad. Los autores más destacados provienen de estos continentes y se centran en investigaciones relacionadas con el diagnóstico, tratamiento y prevención de la parálisis cerebral y la espasticidad.

Además, la tendencia de publicación de artículos en colaboración entre universidades se mantiene constante, no descendiendo por debajo de 90, con un promedio de más de 120 artículos de interés por institución académica. Esto sugiere que las universidades están apostando por la investigación colaborativa como una estrategia para avanzar en el conocimiento de estas patologías.

Estas colaboraciones universitarias en el campo de la parálisis cerebral y la espasticidad se materializan a través de redes colaborativas como la International Royal Children's Hospital Melbourne, University of Toronto y University of Melbourne.

ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

Estas redes permiten a los investigadores compartir recursos, colaborar en proyectos y difundir sus resultados de manera efectiva.

Documents by affiliation ⓘ

Compare the document counts for up to 15 affiliations.

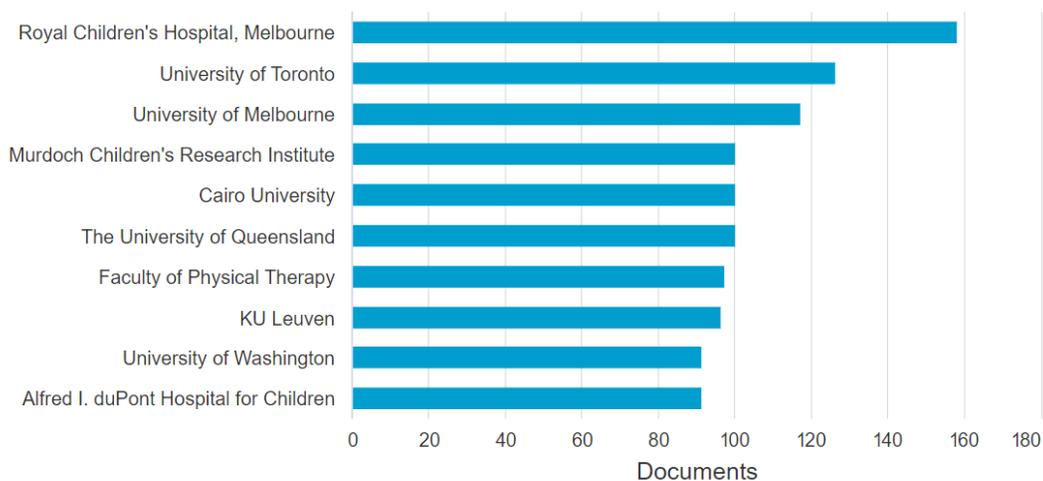


Figura 12. Documentos por afiliación

Fuente: Scopus

Por otro lado, es importante mencionar que Australia es el país con mayor índice en investigación con afiliaciones universitarias y hospitalaria sobre parálisis cerebral debido a estos factores:

- **Una fuerte inversión gubernamental en investigación:** El gobierno australiano ha invertido significativamente en investigación sobre parálisis cerebral, a través de organismos como el National Health and Medical Research Council (NHMRC). Esto ha permitido la creación de un sólido ecosistema de investigación en el país, con la participación de universidades, hospitales y otros centros de investigación [68], [69].
- **Un compromiso con la colaboración internacional:** Australia ha establecido colaboraciones internacionales con otros países, como Estados Unidos, Canadá y Europa. Esto ha permitido al país aprovechar la experiencia y los recursos de otros países, y ha dado lugar a un mayor progreso en la investigación sobre parálisis cerebral [68], [70].

- **Un enfoque centrado en el paciente:** La investigación sobre parálisis cerebral en Australia se centra en las necesidades de los pacientes y sus familias. Esto ha llevado al desarrollo de nuevas terapias y tratamientos que mejoran la calidad de vida de las personas con parálisis cerebral [68].

Algunos ejemplos de investigaciones recientes sobre parálisis cerebral en Australia incluyen:

- **Investigaciones sobre la genética de la parálisis cerebral:** Estas investigaciones buscan identificar los genes que contribuyen al desarrollo de la parálisis cerebral. Esto podría conducir al desarrollo de nuevas formas de prevención o tratamiento [68].
- **Investigaciones sobre la fisiología de la parálisis cerebral:** Estas investigaciones buscan comprender mejor cómo la parálisis cerebral afecta al cerebro y al cuerpo. Esto podría conducir al desarrollo de nuevas terapias y tratamientos que mejoren la función motora y cognitiva [68].
- **Investigaciones sobre la rehabilitación de la parálisis cerebral:** Estas investigaciones buscan desarrollar nuevas formas de ayudar a las personas con parálisis cerebral a alcanzar su máximo potencial. Esto podría incluir el desarrollo de nuevas tecnologías de asistencia, nuevos programas de terapia y nuevas estrategias de educación [68], [71].

2.7. Producción científica por países

En esta sección, se presenta de forma gráfica la producción científica por países **Figura 13**, utilizando una paleta de colores que va desde un tono verde oscuro para indicar una producción intensiva hasta un tono rojo que denota una producción mínima. A partir de esta representación, se puede inferir que el país con una destacada producción científica a nivel global es Estados Unidos, seguido por Canadá, Brasil y varios países europeos como España e Italia, así como naciones del continente asiático. Por otro lado, se observa una producción científica menor en Argentina, Suecia, Noruega y en ciertas regiones de África y Europa.

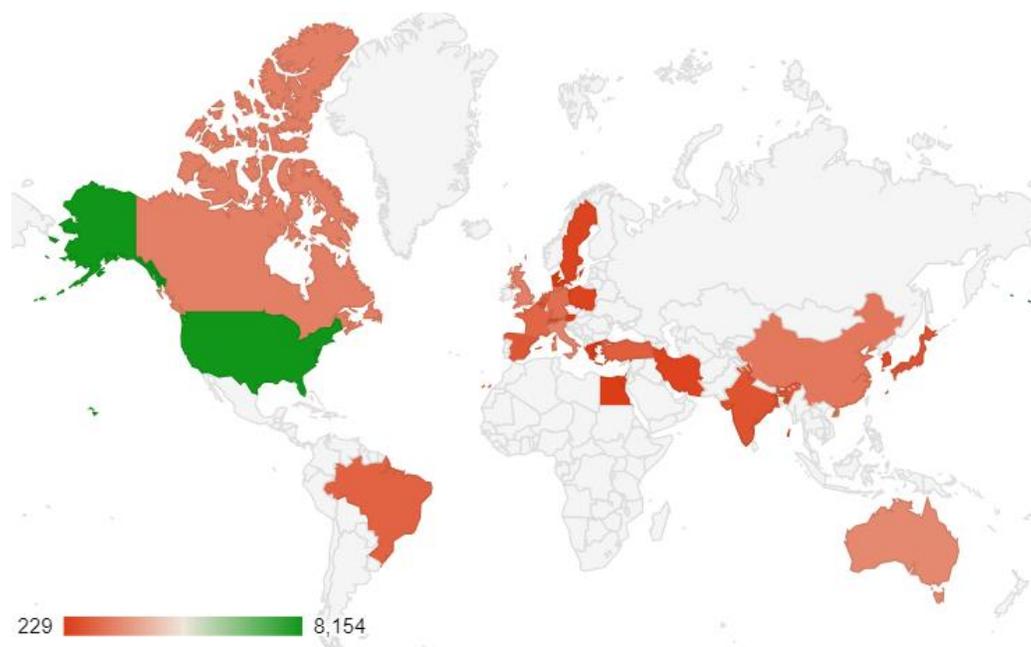


Figura 13. Producción científica por países

Fuente: Google Sheets

2.8. Estructural conceptual del dominio

Aunque la investigación se ha enfocado en los temas clave relacionados con los tratamientos para la parálisis cerebral y su convergencia en el ámbito farmacológico, esta inmersión ha dado lugar a un proceso de integración progresiva en sintonía con las dinámicas tecnológicas destinadas a mejorar la calidad de vida de los pacientes. La **Figura 14** muestra los distintos estadios de inmersión tecnológica y clínica en el contexto de la parálisis cerebral espástica.

Este tipo de análisis se basa en la categorización de los temas clave en cuatro tipologías de análisis, teniendo en cuenta dos variables esenciales: centralidad (la importancia del tema en todo el campo de investigación o análisis) y densidad (la medida de su nivel de desarrollo). Estas tipologías son las siguientes: El primer cuadrante (Q1) abarca materias que están bien desarrolladas y son fundamentales para la construcción del campo científico. Estas materias muestran una fuerte centralidad y una alta densidad, siendo conocidas como "Temas motores" debido a su importancia central en la investigación. Por otro lado, el cuadrante 2 (Q2) engloba

temas que están bien desarrollados internamente, pero están aislados del resto de las materias y tienen una importancia marginal en el avance del campo científico. Estos se denominan "Temas muy desarrollados y aislados", ya que son periféricos y especializados. En cuanto al cuadrante 3 (Q3), representa temas básicos que son importantes para el campo científico, aunque no están bien desarrollados. Son llamados "Temas Básicos y Transversales" porque abordan cuestiones relevantes, pero no han alcanzado un desarrollo significativo. Finalmente, el cuadrante inferior izquierdo representa materias poco desarrolladas y marginales, con baja densidad y centralidad. Estas áreas se conocen como "temas emergentes o en extinción" debido a su falta de desarrollo y relevancia en el campo científico tal cual se indica en [72].

Este análisis ofrece una visión clara de la evolución de la investigación en el campo de la parálisis cerebral espástica, lo que permite entender mejor las tendencias y enfoques predominantes en este ámbito, proporcionando una relación entre el enfoque principal de la investigación acerca de mejorar la calidad de vida de los pacientes, con relación al avance en el campo y su desarrollo a lo largo de los años.

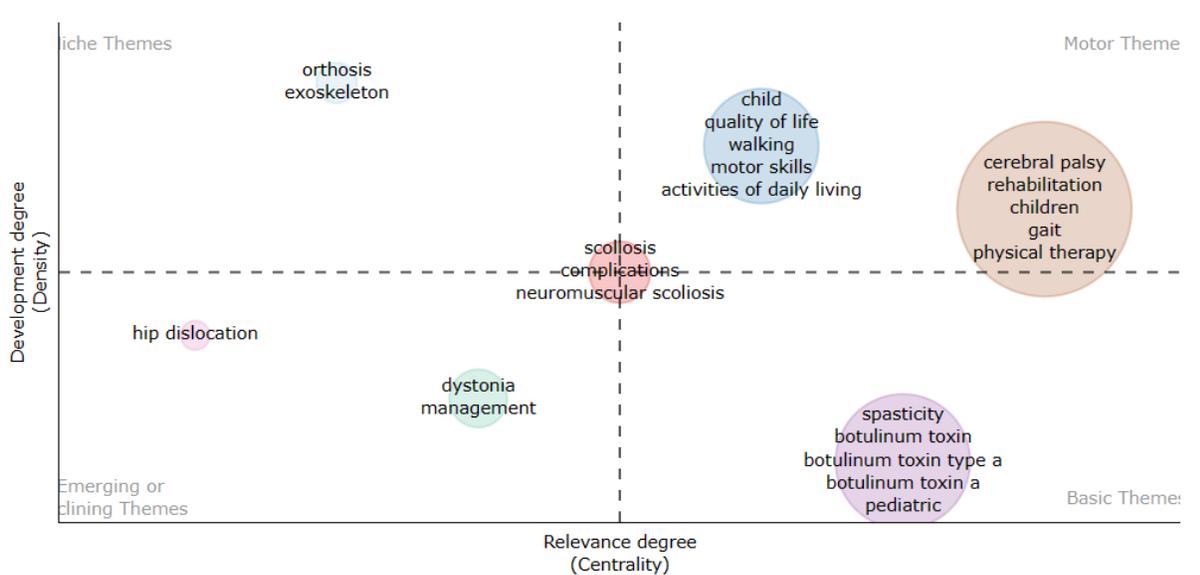


Figura 14. Mapa temático evolución tópicos de crecimiento.

Fuente: Bibliometrix

Grados de Relevancia por cuadrante: El dominio de las técnicas y temáticas más importantes para la rehabilitación, se inicia con los temas motor más empleados como

ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

lo son: la rehabilitación, parálisis cerebral en niños, paso y terapia física, junto con niños, calidad de vida, caminar, habilidades motoras y actividades de la vida diaria, resaltando la importancia y relación de los elementos del mismo grupo.

Temas básicos y transversales: temas con desarrollo estable y alta relevancia como lo son la espasticidad, la toxina botulínica tipo A y toxina botulínica tipo A pediátrica dado que es el tratamiento más utilizado y ampliamente difundido para el manejo de la espasticidad muscular en pacientes con este diagnóstico [73], [74].

Temas emergentes o decadentes: temas relacionados al manejo de la distonía muscular y la dislocación de cadera, en las cuales se denota un menor grado de relevancia en el campo, es decir, son temas cuya investigación ha disminuido dado el alejamiento y tamaño de la burbuja, denotando que pacientes que tengan PCI no necesariamente desarrollen dislocación de cadera.

Temas nicho o especializados: dentro de los tópicos altamente desarrollados encontramos el uso de órtesis (dispositivo de apoyo o dispositivo externo aplicado al cuerpo para complementar aspectos funcionales, estructurales o de soporte) los cuales se adaptan a la medida del paciente y por lo general se utilizan entre el tobillo-pie, en la mano se utiliza la ortesis de Mckie que es una férula textil, fabricada en neopreno (entre otras) y el uso de exoesqueletos como Rokids (dispositivo que ayuda al paciente mediante un soporte con acoples graduables y articulaciones motorizadas para brindar apoyo y asistencia en los movimientos permitiendo desplazar al paciente y que éste pueda aprender a dar pasos y ejercitar los músculos en las terapias de bipedestación) [75].

La cadena de búsqueda cumple con los temas a investigar, destacando las terapias físicas, tratamientos, formas de rehabilitación y caminar, en conjunto con parálisis cerebral en niños, sumado a que actualmente con la terapia se busca la rehabilitación y por lo tanto también mejorar la calidad de vida dentro de los limitantes de cada paciente hasta tal punto que pueda lograr caminar y obtener algo de independencia y no sólo que el niño deje de babear o controlar esfínteres. También se denota el uso de tratamientos invasivos en el manejo de la espasticidad con fármacos como la toxina botulínica como principal agente que actúa como relajante muscular [73].

2.9. Discusión

El análisis bibliométrico presenta un panorama de la investigación sobre los tratamientos de la parálisis cerebral espástica infantil en los últimos tiempos. El crecimiento constante de las publicaciones científicas, sobre todo desde principios de la década de 2000, refleja la creciente preocupación mundial y los esfuerzos de investigación dedicados a esta afección.

Se encontró en el análisis que existen determinados enfoques terapéuticos, corroborado por su elevada centralidad y densidad en el plano cartográfico. En este sentido, existen elementos como la rehabilitación, la fisioterapia y la mejora de la calidad de vida como áreas centrales de atención, que habla de la naturaleza multidisciplinar de la atención a los niños con PC. Notablemente, el uso de inyecciones de toxina botulínica se identifica como un tema básico bien establecido, tal cual se ha mencionado en la literatura. [58]

Un aspecto a resaltar que hay temáticas que pierden importancia según el análisis bibliométrico, temas como la distonía y la luxación de cadera, que son trastornos del movimiento conocidas de la PC, pero se sugiere un interés limitado en la investigación o estrategias de tratamiento eficaces, que requieren más investigación.[76], [77]

El análisis también destaca soluciones tecnológicas emergentes como órtesis, exoesqueletos y otros dispositivos de asistencia como temas de nicho, que son coherentes con el creciente reconocimiento de cómo las ayudas tecnológicas pueden mejorar la función motora y la independencia de los niños con parálisis cerebral. Sin embargo, su naturaleza especializada puede indicar la existencia de barreras de accesibilidad o adopción que justifican una mayor investigación.[78], [79]

Curiosamente, los principales investigadores e instituciones se concentran en países desarrollados como Estados Unidos, Canadá y Europa Occidental, lo que refleja potencialmente las prioridades de financiación de la investigación, pero también puede subrayar la necesidad de una mayor inversión y creación de capacidad en entornos de bajos recursos donde la carga de la CP es importante.

ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

En general, este análisis bibliométrico refleja el panorama de la investigación en torno a los tratamientos de la parálisis cerebral espástica en niños, donde se sugiere que la investigación es de carácter multidisciplinar centrado en la rehabilitación, al tiempo que destacan las oportunidades para un mayor desarrollo de soluciones tecnológicas y para abordar las posibles brechas de acceso a nivel mundial.

Conclusiones parciales

El análisis bibliométrico revela un crecimiento constante en las publicaciones científicas sobre la parálisis cerebral, pasando de sólo 2 artículos en 1951 a más de 300 en 2023. Factores como la mayor conciencia pública, las mejoras en las técnicas de investigación y el aumento de recursos han impulsado este auge. Australia se destaca como líder mundial en este campo, gracias a las inversiones gubernamentales a través del NHMRC y la creación de un sólido ecosistema de investigación con universidades, hospitales y centros de investigación. Las colaboraciones internacionales también han contribuido al progreso. La investigación se centra en las necesidades de los pacientes y sus familias, buscando desarrollar nuevas terapias y tratamientos para mejorar la calidad de vida, incluyendo mejoras en la función motora, la cognición y la comunicación.

Capítulo 3

Desarrollo del prototipo para apoyar la rehabilitación de parálisis cerebral espástica: VibroGym kids

El desarrollo del dispositivo siguió algunos lineamientos de la metodología de diseño mecatrónico **Figura 15**, específicamente, el enfoque de V Cuadrante, con el propósito de estructurar la creación del producto final en etapas. La primera etapa, conocida como "Recopilación de Requisitos", se llevó a cabo mediante la implementación de una matriz de casa, seguidamente, se realizó el análisis del sistema, recreando el boceto realizado a mano alzada en un modelado en 3D el cual fue puesto a prueba con la herramienta CAE de SolidWorks sometiendo el diseño a unas condiciones idénticas a las que experimentará en la realidad. Seguidamente se realizó una estructura en polietileno expandido la cual permitió tener claridad en las dimensiones que llevaría el prototipo. La tercera etapa consistió en el corte de la estructura del material según información del CAE siguiendo las medidas y ángulos del diseño CAD para posteriormente ensamblarlo y realizar las pruebas en el prototipo físico. Consecuentemente, se efectuaron algunos análisis en Proteus Design Suite [80] de los circuitos electrónicos que llevaría el prototipo para su sistema de control y finalmente se realizó el ensamble de la parte mecánica y electrónica de todo el sistema.

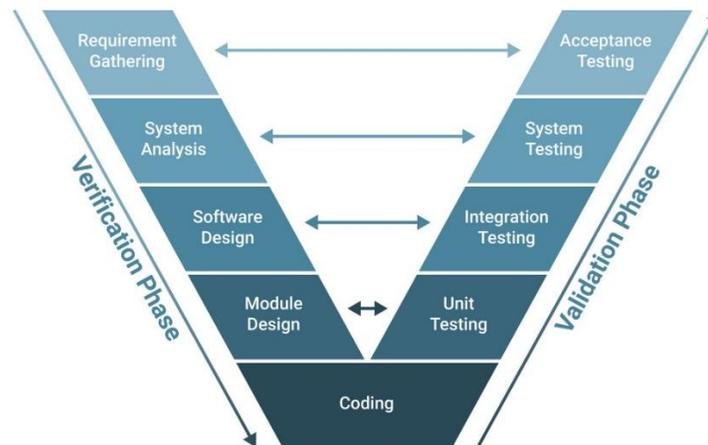


Figura 15. Metodología utilizada en la investigación - V cuadrante

Fuente: [81]

3.1. Etapa 1. Matriz de casa

La Matriz de la Casa de Calidad **Figura 16**, también conocida como Despliegue de la Función Calidad (QFD), es una herramienta de planificación estratégica utilizada para transformar las necesidades de los clientes en características de diseño y atributos de productos o servicios. Se basa en la idea de que la calidad se debe "desplegar" en todos los aspectos del proceso de desarrollo, desde la comprensión de las necesidades del cliente hasta la entrega final del producto o servicio [82]. En esta sección del documento se plantea una matriz de casa que detalla los requisitos solicitados por el cliente (Fisioterapeuta) y las características intrínsecas del producto. Este enfoque permite establecer una correlación efectiva entre ambos conceptos, lo que facilita la clasificación de las necesidades en función de su importancia, ayudando a priorizarlas en el proceso de creación y validación del prototipo [83]. La elaboración de la matriz doméstica se llevó a cabo mediante encuestas dirigidas a dos fisioterapeutas especializados en parálisis cerebral infantil. Estas encuestas abordaban aspectos técnicos específicos que el prototipo debía resolver para cumplir su objetivo principal de proporcionar terapia a domicilio. Se tuvo en cuenta no sólo la población destinataria, compuesta por niños con parálisis cerebral espástica, sino también el rango de edad, que debía situarse entre los 5 y los 10 años, en función de las características morfológicas de cada paciente. A partir de las rigurosas exigencias de los fisioterapeutas con énfasis en pediatría, se construyó la matriz domiciliaria asignando a cada exigencia un valor puntuado por el especialista en una escala de 1

a 12. En esta escala, 1 representó el valor mínimo y 12 el valor máximo, proporcionando así una evaluación detallada de cada aspecto crucial identificado por los profesionales de salud.

		DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE ESTIMULACIÓN MUSCULAR PARA MITIGAR LA ESPASTICIDAD EN NIÑOS CON PARÁLISIS CEREBRAL MEDIANTE VIBROTERAPIA											
		Obligatorio	Deseable	Importancia	Estrategia diseño	Máximo peso	Distintas terapias	Diagrama fuerzas	Mantenimiento	Precisión angular:	Factores físicos y químicos:	Selección materiales	
Requerimientos de Calidad													
Desempeño funcional	Etapa de desarrollo	Resistente	X		12	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	▲	⊖	⊖
		Segura	X		11	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	▲
		Ergonómica		X	10	⊖	⊖	⊖	⊖	▲	⊖	⊖	⊖
		Comodidad		X	9	⊖	⊖	⊖	▲	▲	⊖	▲	⊖
		Expandible	X		8	⊖	⊖	▲	▲	▲	⊖	⊖	▲
		Portable		X	7	⊖	⊖	⊖	▲	⊖	⊖	▲	⊖
	Etapa de prueba	Adaptable	X		6	⊖	▲	⊖	⊖	▲	⊖	▲	⊖
		Estética		X	5	⊖	▲	▲	▲	⊖	⊖	⊖	⊖
		Fácil limpieza	X		4	⊖	▲	⊖	▲	⊖	▲	⊖	⊖
		Fácil uso	X		3	⊖	▲	⊖	▲	⊖	⊖	▲	⊖
		Modular		X	2	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	▲	▲	⊖
		Ligera		X	1	⊖	⊖	▲	⊖	⊖	▲	▲	⊖

Figura 16. Matriz de casa de calidad utilizada para reunir requerimientos

Fuente: Autores

Una vez finalizada la elaboración de la Matriz de Casa, se destacó que los requisitos que acumularon la mayor puntuación en la evaluación fueron la "resistencia" "seguridad" "comodidad," y "adaptabilidad a distintas terapias." Estos resultados se alinearon coherentemente con la clasificación de requisitos catalogados como "obligatorios," previamente establecida.

Asimismo, la Matriz de Casa proporcionó un entendimiento fundamental de que el proceso de diseño y la selección de materiales constituyen etapas críticas para asegurar la ejecución sin contratiempos de las demás características del prototipo, con especial énfasis en el análisis de fuerzas y esfuerzos. Esto subraya la importancia de abordar meticulosamente la resolución de problemas relacionados con la resistencia y la seguridad en la fase de diseño. ANEXO A (Encuesta requerimientos)

3.2. Etapa 2. Análisis del sistema

ANÁLISIS DEL SISTEMA

3.2.1. Boceto a mano alzada

El análisis del sistema se llevó a cabo principalmente mediante la creación de varios bocetos a mano alzada **Figura 17**. Estos bocetos abordaban medidas concretas, como una cama de 1,20x60 cm, teniendo en cuenta las estaturas medias de la población destinataria. En el proceso de diseño, se priorizaron características clave: se pretendía que el prototipo fuera desmontable para cumplir una de las especificaciones esbozadas en la formulación del problema, que proponía un enfoque modular para realizar terapias en casa. Además, se abordó el diseño mecatrónico para permitir su uso en las tres terapias más comunes (decúbito supino, decúbito prono y decúbito prono invertido) sin necesidad de trasladar al niño al suelo para colocarlo en posición horizontal, utilizando un sistema mecánico para posicionar la cama junto con un sistema vibratorio. Asimismo, el boceto seleccionado tuvo en cuenta la facilidad de acceso para la limpieza, la seguridad al elevar la cama, la resistencia y un diseño visualmente agradable; para proteger la estructura se utilizó poliestireno expandido, también conocido como Icopor.

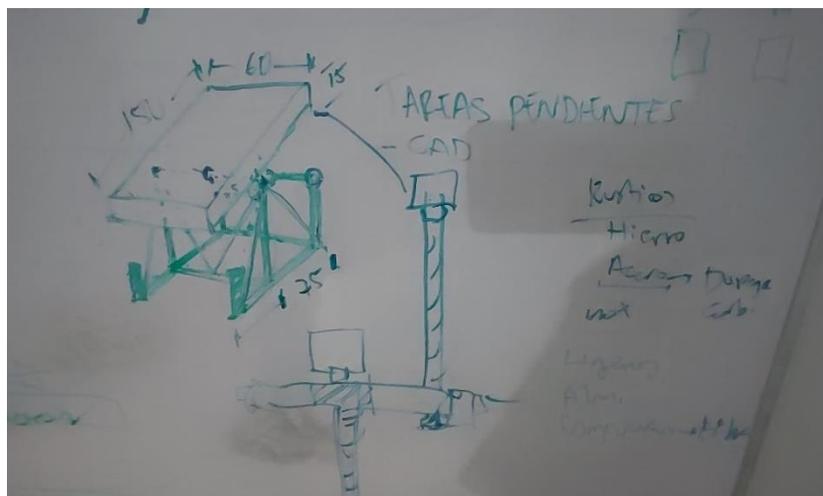


Figura 17. Boceto a mano alzada

Fuente: Autores

3.2.2. Diseño CAD y CAE del prototipo Vibrogym Kids

Teniendo en cuenta la información recopilada en la fase anterior, se pasó a la fase de diseño utilizando software de diseño asistido por ordenador. En este caso, se ha

utilizado SolidWorks [84] para apoyar el proceso de diseño asistido por computadora (CAD). Durante esta fase, se crean cada uno de los componentes mecánicos del prototipo, siguiendo las pautas establecidas en el boceto inicial a mano alzada. Estos elementos se integraron progresivamente en el diseño CAD a medida que se adquirían los componentes y se definió el sistema mecánico necesario para mover la camilla. Este enfoque garantizó la coherencia entre la concepción inicial y la implementación práctica, asegurando el desarrollo fluido y eficaz del prototipo.

Una vez completado el diseño CAD, se realiza el análisis de deformaciones y tensiones utilizando el mismo software. Este proceso se dividió en dos fases fundamentales. En primer lugar, se realizó el análisis de elementos finitos (FEA) de la estructura portante. Este análisis desglosó las fuerzas que actuarían sobre la estructura, lo que permitió determinar el material y las dimensiones adecuadas para garantizar que el prototipo pudiera resistir mínimamente una carga de 500 newtons (peso promedio de 50 kilos en niños entre 6 a 12 años) distribuida uniformemente a lo largo de toda su longitud. Es importante señalar que en esta fase no se tuvo en cuenta el peso de los actuadores y los elementos estructurales, sino que se centró exclusivamente en la carga externa aplicada al prototipo (el paciente que lleva el dispositivo). Este enfoque proporcionó una base sólida para avanzar en el diseño detallado del prototipo y la selección de materiales, garantizando su integridad estructural en condiciones de funcionamiento específicas. En la segunda fase se realizó una investigación para seleccionar el material que sería empleado en el diseño. Se logró identificar el Acero Estructural A529, una elección común en proyectos de ingeniería. La selección de este material se basó en consideraciones mecánicas esenciales, tales como el factor de seguridad, propiedades fisicoquímicas para soldadura, peso específico, grado, calibre, límite elástico y resistencia a la tracción.

Una vez identificado el material que cumplía con los requisitos mínimos establecidos, se procede a incorporarlo en SolidWorks para llevar a cabo nuevamente el estudio (CAE). Este enfoque garantiza una evaluación precisa de las características estructurales del diseño, respaldando la toma de decisiones fundamentada en datos concretos y optimizando la eficiencia del prototipo.

3.2.3. Diseño CAD Estructura Modular

ANÁLISIS DEL SISTEMA

Una vez establecida una base de diseño, se procedió a la ubicación estratégica de los soportes con el objetivo de lograr una distribución uniforme de fuerzas en toda la estructura. Posteriormente, se llevó a cabo un estudio CAE (Análisis por Elementos Finitos) con el propósito de evaluar la idoneidad del diseño de la estructura, específicamente el lateral inferior, para soportar una carga de 500 Newtons.

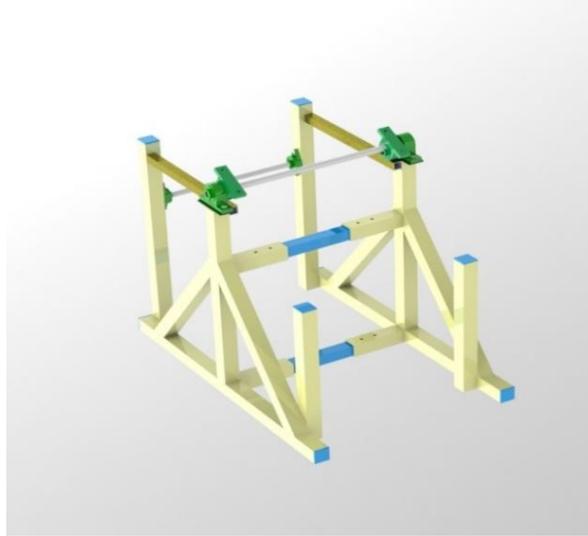


Figura 18. Diseño CAD ensamble estructura inferior

Fuente: Autores

La cama está apoyada en una varilla de acero y dos chumaceras **Figura 19** para mitigar la carga y el esfuerzo del motor de elevación. Este diseño permite que la chumacera se incline de manera gradual a medida que el motor realiza la elevación, optimizando la eficiencia y durabilidad del sistema.



Figura 19. Diseño CAD – incorporación base cama
Fuente: Autores

El sistema de elevación **Figura 20** y **Figura 21**, anclado al soporte de la cama y a la estructura principal, posibilita un movimiento gradual de la estructura superior. Esta funcionalidad permite la realización de diversas terapias al subir y bajar la estructura, ofreciendo versatilidad y adaptabilidad para diferentes necesidades terapéuticas.



Figura 20. Diseño CAD con sistema de elevación
Fuente: Autores

ANÁLISIS DEL SISTEMA

3.2.4. Diseño CAD sistema de elevación

En el sistema de elevación, se empleó un motor de limpiaparabrisas de un vehículo Mazda debido a su potencia y ligereza. Además, se diseñó una estructura que incluye un émbolo, un tornillo sin fin, tuercas personalizadas acorde al tornillo y una chumacera **Figura 22** que sujeta el sistema y el soporte de la cama. Esto no solo facilita el movimiento de inclinación, sino que también reduce la carga de esfuerzo sobre el motor y la caja reductora anclada al mismo.



Figura 21. Diseño CAD chumacera soporte de elevación de camilla

Fuente: Autores

El émbolo de acero y el tornillo sin fin **Figura 23** están unidos a través de una tuerca fija que forma una unión roscada con el émbolo. Cuando el motor gira en sentido horario, el tornillo se desenrolla de la unión roscada, lo que resulta en el descenso de la camilla. En cambio, si el motor gira en sentido antihorario, se produce el efecto opuesto, es decir, el tornillo se enrolla en la unión roscada, elevando la camilla.

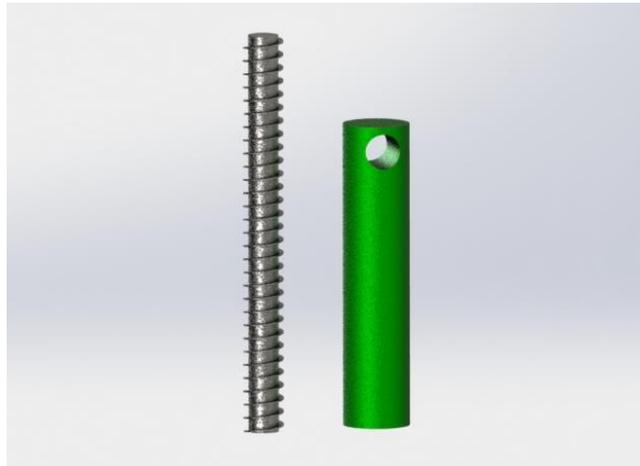


Figura 22. Diseño CAD Soporte Elevación
Fuente: Autores

El tornillo sin fin o varilla roscada **Figura 24** es de un acero al carbono medio con buenas propiedades de resistencia, tenacidad y maquinabilidad, lo que lo hace ideal para su aplicación en sistemas de elevación, especialmente en tornillos sin fin que experimentan cargas pesadas y desgaste [85]. Destaca por su resistencia a la tracción de hasta 620 MPa, su tenacidad de hasta 50 J/cm² y su facilidad para ser mecanizado, facilitando la fabricación de tornillos sin fin de precisión en estos sistemas.



Figura 23. Diseño CAD varilla roscada ASTMA1
Fuente: Autores

ANÁLISIS DEL SISTEMA

En la **Figura 25** se muestra el motor del sistema de elevación. Este componente del prototipo es responsable de proporcionar la fuerza necesaria para elevar la camilla y permitir alcanzar los ángulos para cada terapia

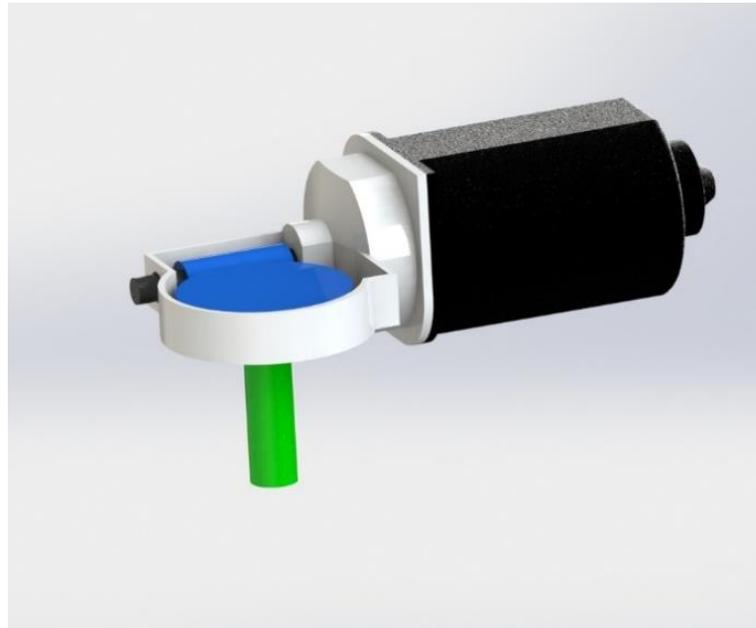


Figura 24. Diseño CAD motor elevación

Fuente: Autores

3.2.5. Diseño CAD del sistema vibratorio

El diseño CAD del sistema de vibración se inspiró en los mandos de Xbox, concretamente en su sistema de vibración, debido a que permite la manipulación fácil de los motores para el respectivo mantenimiento o en caso de realizar cambio del motor [86]. Se implementó una estrategia de encapsulado del motor con material PETG (Polyethylene terephthalate) para optimizar la estabilidad y la potencia de la vibración. Este material se seleccionó por su combinación única de resistencia y flexibilidad, que permite que el contrapeso se mueva con eficacia sin comprometer la integridad del motor.

El PETG proporciona una solución robusta para garantizar que el movimiento del contrapeso no afecte negativamente a la estabilidad de los motores durante el funcionamiento del sistema vibratorio. Además, su flexibilidad proporciona un grado

adicional de adaptabilidad a las exigencias del diseño, garantizando una respuesta vibratoria eficaz y coherente.

Un aspecto destacado del diseño es que permite destapar individualmente los encapsulados. Esta característica simplifica el proceso de mantenimiento y permite inspeccionar a fondo cada motor por separado dentro de su encapsulado. Esto facilita la identificación y solución de posibles problemas específicos de un motor sin interferir con los demás, lo que proporciona un mayor control y precisión en la gestión y ajuste del sistema vibratorio.

La tensión en los músculos dorsales puede ocasionar diversos problemas, como dolor en la espalda, especialmente en la zona lumbar. Además, puede limitar el movimiento, dificultando giros y agachamientos, y provocar una postura deficiente, como una curvatura excesiva de la espalda. Por lo tanto, es crucial relajar los músculos dorsales en casos de espasticidad para reducir el dolor, mejorar la movilidad y corregir la postura.



Figura 25. Diseño CAD encapsulado-motores

Fuente: Autores

En la **Figura 26** se puede observar los encapsulados de la camilla, los cuales se distribuyen en diferentes zonas de la espalda según las necesidades de cada niño o paciente.



Figura 26. Diseño CAD cuello

Fuente: Autores

Los encapsulados diseñados para el cuello y los hombros **Figura 27** se han desarrollado considerando medidas específicas para lograr la relajación del músculo semiespinoso de la cabeza y los hombros en niños de 6 años con parálisis cerebral [87].

Relajación muscular: Las vibraciones pueden ayudar a relajar la tensión en los músculos, incluyendo el trapecio inferior y los dorsales. Esto puede ser beneficioso para aliviar la rigidez y reducir la sensación de incomodidad o dolor en la zona [43].

Mejora de la circulación sanguínea: La vibración puede estimular la circulación sanguínea en la zona tratada. Una mejor circulación puede contribuir a la entrega de oxígeno y nutrientes a los músculos, favoreciendo la recuperación y la salud general de los tejidos[43].



Figura 27. Diseño CAD espalda

Fuente: Autores

En la **Figura 28** se observa el encapsulado que se sitúa en la camilla en la zona de la mitad de la espalda, su forma de estrella permite que, al momento de acostarse en la camilla, este encapsulado no maltrate la columna directamente

- **Mejorar la circulación sanguínea:** Las vibraciones aumentan el flujo de sangre a los músculos, lo que puede ayudar a mejorar su rendimiento y recuperación [88].
- **Reducir la tensión muscular:** Las vibraciones pueden ayudar a relajar los músculos tensos y aliviar el dolor [89].
- **Aumentar la flexibilidad:** Las vibraciones pueden ayudar a aumentar la flexibilidad de los músculos y tendones [90].
- **Mejorar la propiocepción:** Las vibraciones pueden ayudar a mejorar la capacidad del cuerpo para percibir la posición y el movimiento de las articulaciones [91].

ANÁLISIS DEL SISTEMA

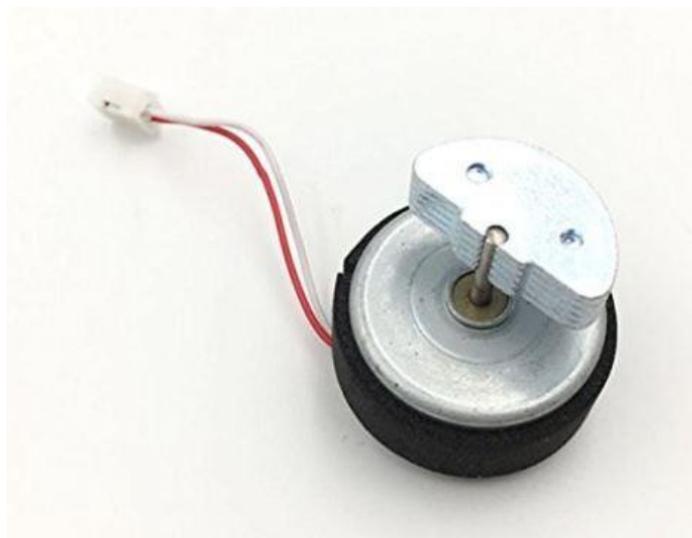


Figura 28. Motor vibrador implementado en el sistema vibratorio

Fuente: Autores

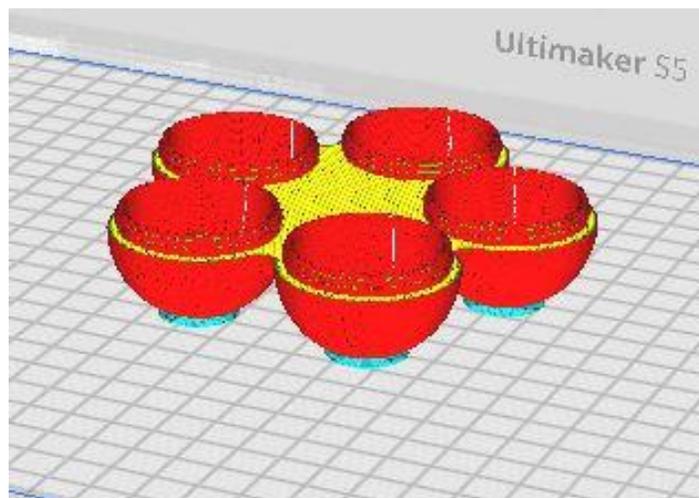


Figura 29. Encapsulado espalda software CURA

Fuente: Autores



Figura 30. Diseño CAD sin sistema vibratorio

Fuente: Autores

Se presenta una descripción detallada del sistema en la **Figura 30** sin la implementación de un sistema de vibración. Este análisis preliminar permite observar el funcionamiento y los componentes en su estado básico, proporcionando una comprensión clara del diseño actual. Evaluar el sistema sin el componente de vibración en esta fase inicial sirve de base fundamental para el desarrollo del diseño físico posterior.

3.2.6. Descripción y ejecución del material acero estructural a529 grado 50

El software utilizado fue SolidWorks para realizar el análisis de tensiones y deformaciones prevé diversos materiales, como madera, materiales ferrosos y no ferrosos y materiales sintéticos [84]. Aunque, concretamente, no se encontró ninguna opción predeterminada para el tipo de acero utilizado en el desarrollo del prototipo que cumpliera las características fisicoquímicas necesarias, se tomó la decisión de crear

ANÁLISIS DEL SISTEMA

una entrada personalizada basada en las fichas técnicas del acero disponible en los entornos comerciales locales.

Inicialmente, el diseño de la estructura se abordó considerando las propiedades del aluminio estructural **Figura 31** comúnmente utilizado en proyectos industriales. Sin embargo, al realizar cotizaciones con diferentes proveedores, el alto costo por metro del aluminio impidió su implementación como material de soporte en la estructura. Ante esta situación, se exploraron alternativas más económicas que, aunque no eran tan ligeras como el aluminio, ofrecían ventajas mecánicas y facilitaban la unión empleando remaches, tornillos y soldadura manual por arco eléctrico.

Finalmente, se decidió montar la estructura utilizando acero estructural A529 grado 50, calibre 14, y un tubo cuadrado de 50x50 mm. Este tipo de acero, robusto y con un límite elástico estándar de 50.000 psi, presentaba una importante reducción de peso en comparación con otros aceros estructurales. Además, ofrece ventajas mecánicas y facilita la unión mediante remaches, pernos y soldadura, cumpliendo así las diversas características requeridas para el proyecto. De este modo, facilita la consecución de uno de los objetivos fundamentales establecidos en la matriz de diseño, que requiere que el prototipo sea modular[92].

Propiedades físicas	Métrico
Densidad	7,80 g/cc

Propiedades mecánicas	Métrico
Resistencia a la tracción en rotura	483 - 689 MPa
Resistencia a la tracción, rendimiento	> = 345MPa
Alargamiento en rotura	>= 16%
	>= 19%

Propiedades de los elementos componentes	Métrico
Carbono, C	<= 0,27%
Cobre	>= 0,20%
Hierro, Fe	>= 97,69%
Manganeso	<= 1,35%
Fósforo, P	<= 0,040%
Silicio, Si	<= 0,40%
Azufre, S	<= 0,050%

Figura 31. Características químicas material creado

Fuente: [93]

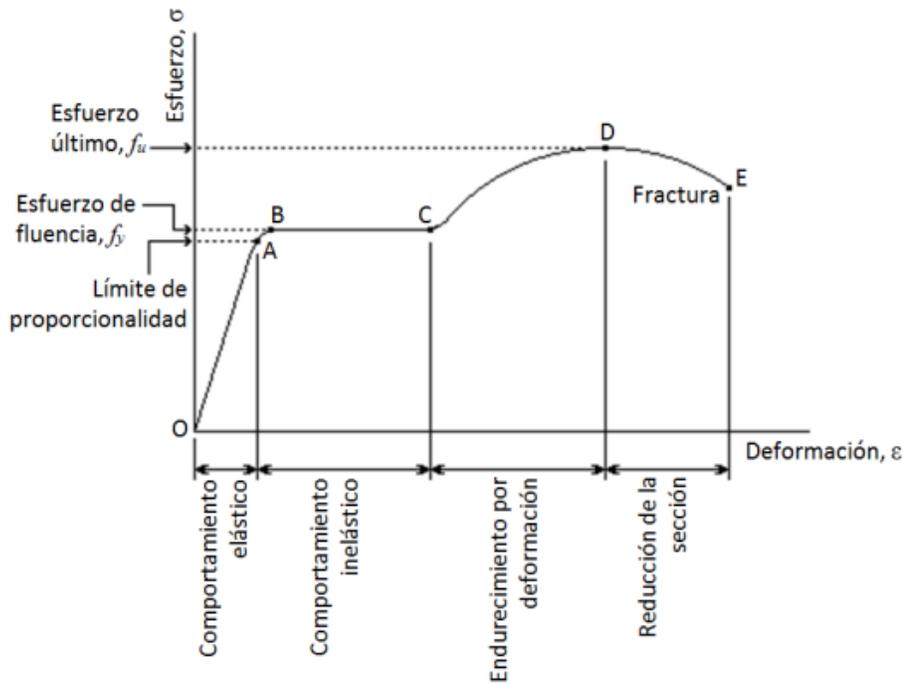


Figura 32. Gráfica esfuerzo vs deformación material ASTM A529
Fuente: SolidWorks

Las propiedades físicas adicionales **Figura 32**, como la deformación, resistencia a la tracción y compresión, están intrínsecamente vinculadas a la composición química del material. En este caso, el 97.69% de la composición corresponde a hierro con un bajo dopaje de carbono para mejorar la resistencia a la tracción, y presencia de cobre para incrementar la ductilidad. El contenido medio de silicio contribuye a mejorar la templabilidad, elevando significativamente el límite elástico y la resistencia a la fatiga. Además, el alto contenido de manganeso no sólo proporciona resistencia a la oxidación y corrosión, sino que también contribuye a la eliminación de impurezas como azufre, fósforo y oxígeno [94].

Este material exhibe versatilidad en su manipulación, permitiendo soldadura mediante técnicas convencionales, posibilidad de atornillado, remachado y facilidad de mecanizado. Debido a estas propiedades, es ampliamente utilizado como material de soporte en diversas aplicaciones, como puentes, edificios, estructuras para máquinas ligeras, equipos, techos y paredes. Cabe destacar que su única limitación notable es

ANÁLISIS DEL SISTEMA

la incapacidad de ser soldado mediante la técnica de soldadura autógena, que implica oxígeno y gas combustible [95].

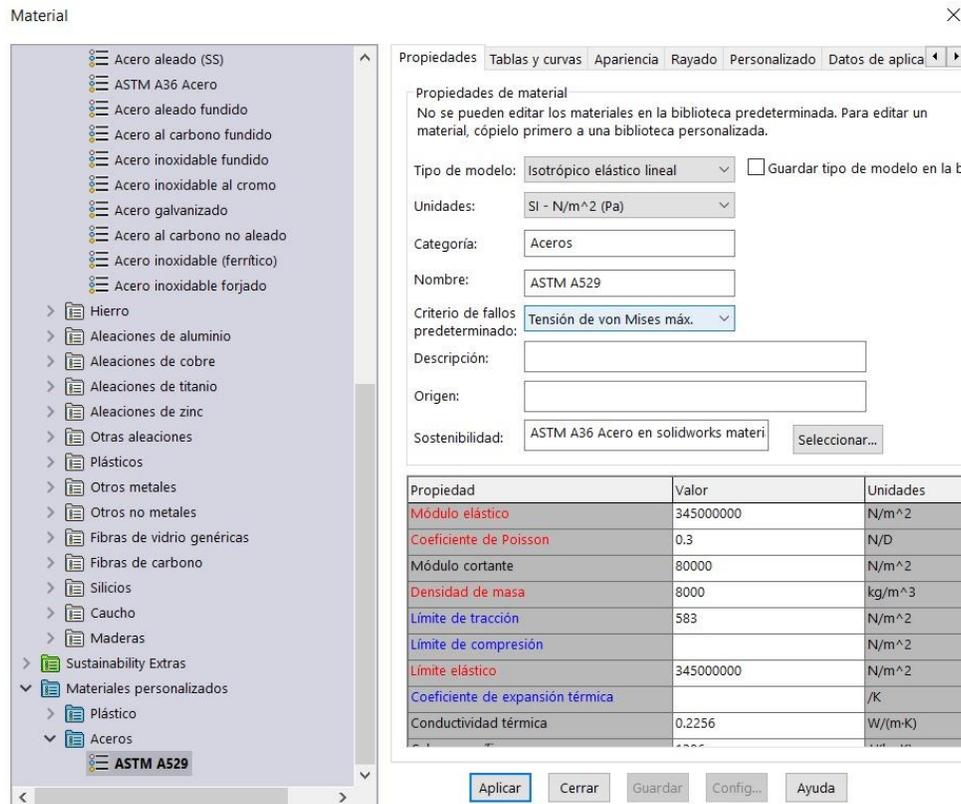


Figura 33. Creación del material en SolidWorks
Fuente: Autores

En la **Figura 33** se puede observar los datos utilizados para la creación del material en SolidWorks, el módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, módulo cortante, densidad de masa y el límite elástico.

3.2.7. Ejecución y análisis CAE del sistema propuesto

El análisis CAE o Ingeniería Asistida por Computadora proporciona la capacidad de simular el rendimiento del material creado, incorporando medidas y especificaciones cruciales. Esta aproximación basada en software permite optimizar costos y tiempos durante la fase de construcción [84]. El proceso inicia con la creación de la geometría tridimensional de la estructura, seguido por una fase de preprocesamiento que incluye la asignación de materiales, restricciones y/o interacciones entre componentes para el sistema estático, junto con fuerzas, vibraciones y/o masas relevantes. Este enfoque

lleva los componentes físicos al entorno computacional, proporcionando interpretaciones precisas y soluciones detalladas para el modelo.

El presente informe aborda el análisis por elementos finitos (CAE) de una estructura diseñada para soportar cargas aplicadas en situaciones clínicas específicas. La materialización de este análisis se basó en el uso del acero 529 Grado 50 el cual proporcionó en el estudio un factor de seguridad de 77.

Características del Material:

El acero 529 Grado 50 se seleccionó por su excelente resistencia y tenacidad, características cruciales para aplicaciones médicas. Este material cumple con los estándares necesarios para garantizar la integridad y la seguridad de la estructura, a la vez que proporciona una flexibilidad adecuada para adaptarse a las condiciones de carga específicas.

Parámetros de Análisis CAE:

Se realizó un análisis de elementos finitos utilizando software especializado SolidWorks, considerando las propiedades mecánicas del acero 529 Grado 50. Los parámetros esenciales incluyeron las condiciones de carga, las restricciones y los factores de seguridad.

Carga Aplicada y Resultados del Análisis:

La carga aplicada en el análisis correspondió a 500N, que representa el peso estimado de un paciente en la estructura. Los resultados del análisis CAE demostraron que la estructura diseñada con el acero 529 Grado 50 supera con éxito esta carga aplicada. El factor de seguridad mínimo de 77 garantiza que la estructura no solo cumple con las normativas de seguridad, sino que también ofrece un margen significativo para resistir cargas adicionales o variaciones en las condiciones de carga.

ANÁLISIS DEL SISTEMA

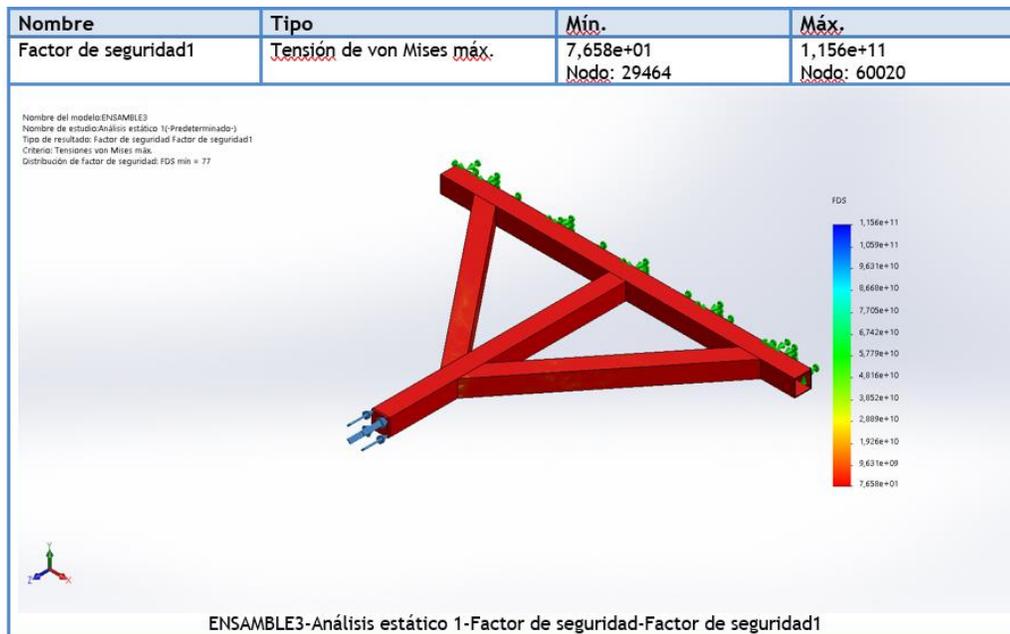


Figura 34 Factor de seguridad CAE análisis de elementos finitos
Fuente: SolidWorks

Implicaciones en el Diseño y Aplicación Clínica:

La baja deformación **Figura 34** registrada demuestra que el diseño CAD y el material seleccionado son altamente efectivos para la aplicación médica prevista. La estructura mantiene su forma original dentro de los límites aceptables, asegurando la comodidad y seguridad del paciente.

Dada la robustez demostrada en el análisis CAE, se recomienda proceder con la implementación del Diseño Asistido por Computadora (CAD) define la producción final de la estructura. Es crucial seguir las especificaciones de fabricación y asegurarse de que se mantengan los estándares de calidad para garantizar la fiabilidad y durabilidad de la estructura en entornos clínicos.

3.3. Etapa 3. Construcción del prototipo

En esta fase se expondrán los elementos que constituyen la parte mecánica del prototipo. En esta sección se detallarán los componentes y sus respectivas funciones dentro del sistema, lo que permitirá comprender el diseño y la estructura mecánica. La comprensión de estos elementos es esencial para evaluar el rendimiento y la eficiencia del prototipo con el estudio de elementos finitos e identificar posibles áreas de mejora en futuras iteraciones del diseño.

3.3.1. Construcción física de la estructura mecánica del prototipo

UNIÓN: SOLDADURA ARCO

La decisión de soldar la estructura se basa en la información proporcionada por estudios detallados realizados por expertos. El análisis se centra en el comportamiento de las uniones sometidas a esfuerzos cortantes entre vigas primarias y de acoplamiento, centrándose explícitamente en el material de acero ASTM A529 Grado 50.

En el estudio, se realizaron comparaciones entre uniones atornilladas y soldadas, utilizando tornillos de acero ASTM A325 con tuercas hexagonales en el caso de uniones atornilladas, y soldadura de arco con electrodo revestido (SMAW) con electrodos E7018 para las uniones soldadas. Se evaluaron factores como el comportamiento, la resistencia estructural, el estrés y la deformación [96].

Los resultados obtenidos indicaron que ambas formas de unión (atornilladas y soldadas) son capaces de soportar las fuerzas cortantes requeridas para el dispositivo. Sin embargo, se destacó que las uniones soldadas son ligeramente más eficientes en términos de rendimiento estructural. A pesar de esto, se reconoce que la soldadura es más compleja de realizar en comparación con las uniones atornilladas.

La eficiencia de las uniones soldadas se relaciona directamente con su capacidad para resistir las fuerzas cortantes necesarias para el dispositivo, lo que sugiere que la soldadura puede ser la opción preferida para garantizar una mayor resistencia y estabilidad estructural.

Es esencial recordar que esta decisión se basa en un análisis integral que tiene en cuenta no sólo la capacidad de carga, sino también el comportamiento, la resistencia, la tensión y la deformación. La complejidad de la soldadura se equilibra con los beneficios estructurales que ofrece, lo que garantiza que la decisión de soldar la estructura esté respaldada por datos vitales para el desarrollo satisfactorio del dispositivo [97].

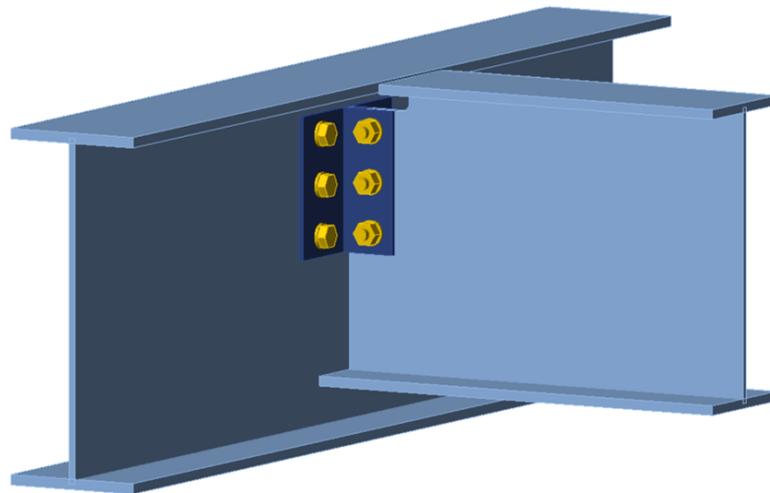


Figura 35. Diseño unión atornillada
Fuente: [97]

La **Figura 35** proporciona una representación tridimensional detallada de la unión entre dos vigas, donde una viga principal se conecta de manera integral a otra viga de remate simple. Esta conexión se realiza con tornillos que atraviesan una placa o platina especialmente diseñada con una configuración de doble ángulo.

En la visualización tridimensional, se destaca la precisión y la robustez de la conexión atornillada, evidenciando cada elemento de la estructura. La placa de doble ángulo actúa como un componente clave, brindando estabilidad adicional a la unión y asegurando una distribución uniforme de las fuerzas.

Esta representación gráfica proporciona una visión clara de la geometría y disposición de los elementos en la conexión. Los detalles visuales permiten apreciar la eficacia de

la disposición de tornillos y la función estratégica de la placa de doble ángulo en la transmisión de cargas entre las vigas.

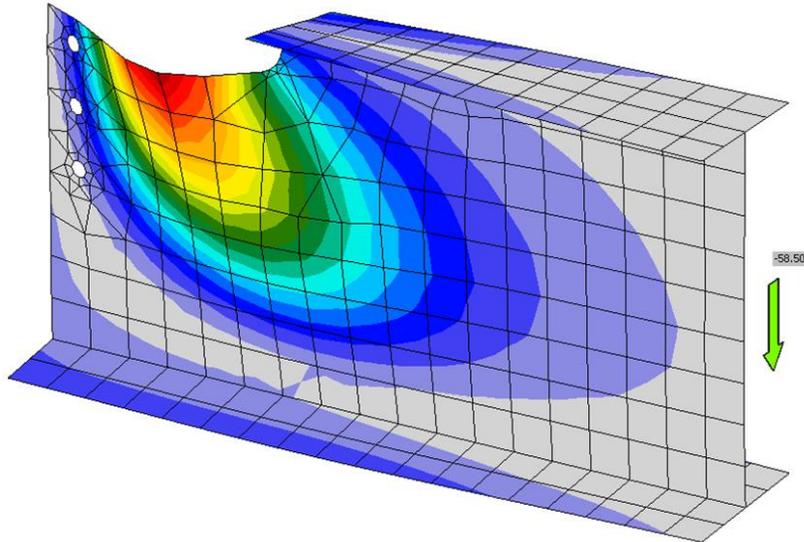


Figura 36. Deformidad unión atornillada

Fuente: [97]

En la **Figura 37** se presentan los resultados detallados del análisis realizado en la viga de remate simple, con una longitud de remate de 12 pulgadas. Se observa una significativa deformación en la malla, proporcionando información crucial sobre el comportamiento estructural ante las condiciones de carga especificadas.

La representación gráfica pone de manifiesto claramente la respuesta de la viga atornillada bajo carga, destacando áreas específicas donde se produce una deformación apreciable. Este enfoque visual facilita la identificación de zonas críticas y la evaluación de la magnitud de la deformación a lo largo de la estructura.

La longitud de remate de 12 pulgadas se considera como un parámetro central en este análisis, y la figura proporciona una instantánea detallada de cómo esta dimensión

afecta la integridad estructural. La deformación registrada en la malla subraya la importancia de comprender y mitigar los efectos de carga en la viga de remate simple.

En otra prueba de unión de la viga de remate soldadas a platina y unión atornillada a la viga principal se analiza el comportamiento estructural quedando de la siguiente forma:

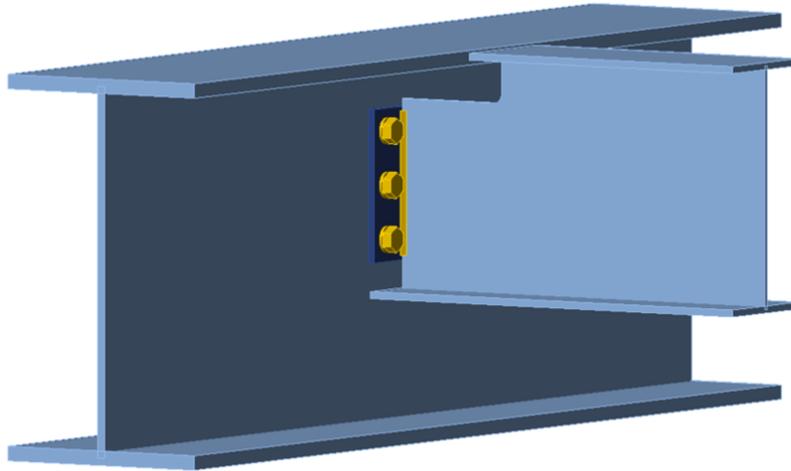


Figura 37. Diseño unión atornillada – soldada
Fuente: [97]

Figura 38 Vista tridimensional de una viga unida a otra viga de remate simple (conexión de placa de extremo de corte atornillada/soldada)

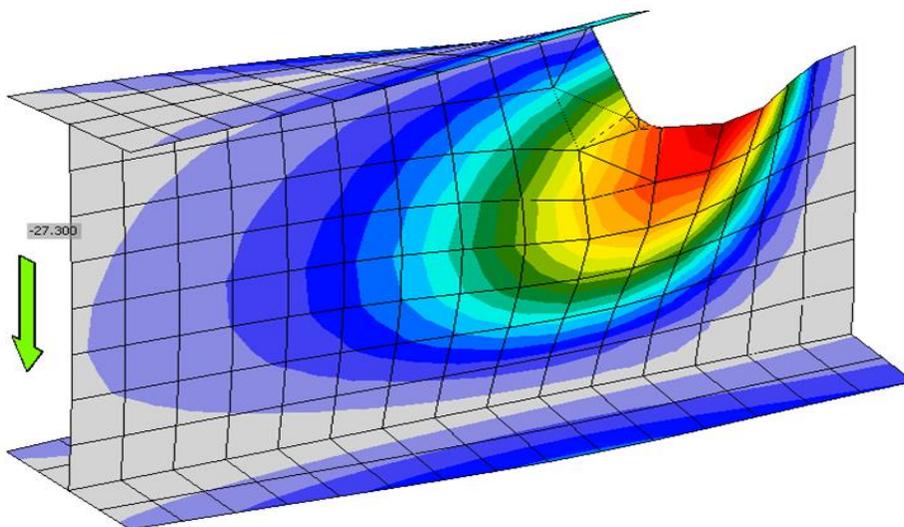


Figura 38. Deformidad unión atornillada- soldada
Fuente: [97]

Figura 39 Resultado del análisis en la viga de remate simple soldada atornillada, longitud de viga: 9 pulgadas (se denota en la malla una deformación cortante bastante considerable)

Por último, se somete a prueba la unión entre la viga principal y la viga de remate mediante soldadura de una placa/platina en los dos lados de la siguiente manera:

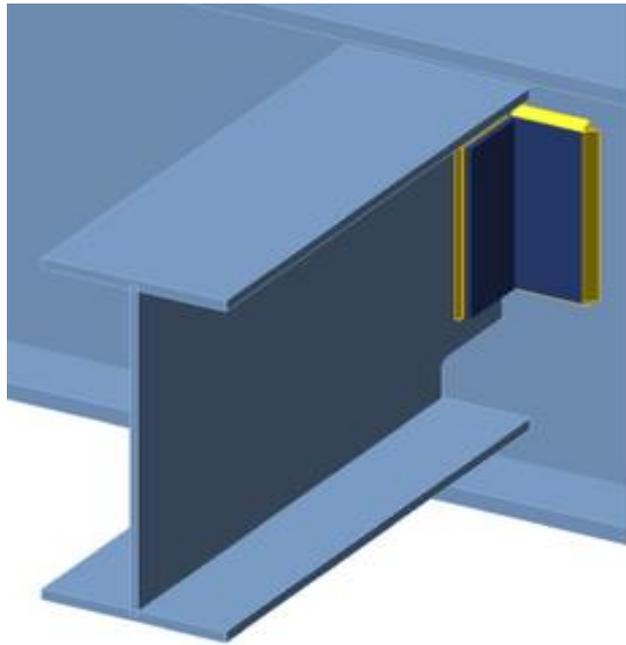


Figura 39. Diseño uniones soldadas
Fuente: [97]

Figura 40 Vista tridimensional de una viga unida a otra viga de remate simple (conexión de placa de doble ángulo con extremos soldados)

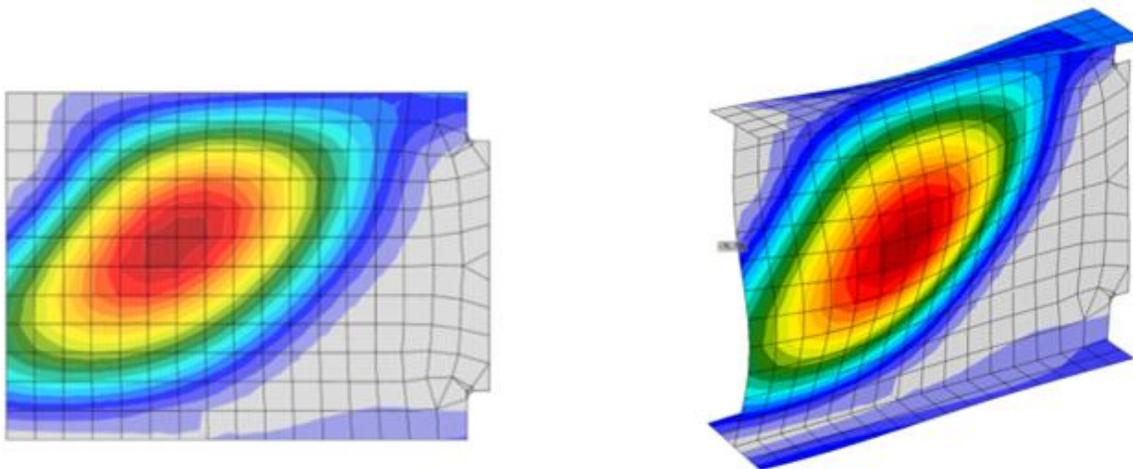


Figura 40. Deformación uniones soldadas

Fuente: [97]

En la **Figura 41** presentan los resultados detallados del análisis realizado en la viga de remate simple, cuyos extremos han sido soldados. La longitud de los remates es de 9 pulgadas, y se observa una deformación en la parte central de la viga, como se indica en la malla.

La representación gráfica destaca de manera clara y precisa cómo la soldadura en los extremos de la viga ha influido en su comportamiento estructural. Contrario a las deformaciones más pronunciadas observadas en otros métodos de unión, la figura refleja una deformación en la parte central de la viga soldada.

La elección de una longitud de remate de 9 pulgadas como parámetro en este análisis se revela en la **Figura 41**, y se muestra cómo esta dimensión específica contribuye a la minimización de la deformación en comparación con otras configuraciones. La representación visual permite una evaluación detallada de la eficacia de la soldadura en la reducción de deformaciones no deseadas.

Asimismo, es pertinente señalar que este análisis no revela defectos en la unión; por el contrario, evidencia una deformación en el material, aspecto crucial en la investigación del comportamiento estructural con respecto a la conexión ideal en el montaje del prototipo propuesto. Concluimos, de esta manera, que la decisión de soldar la estructura en los puntos de apoyo con mayor carga es la elección predominante para mejorar el factor de seguridad y cumplir con los requisitos iniciales [97].

SOLDADURA: AWS E6011 a 1/8"

Una vez determinada la modalidad de unión, en este caso, la soldadura de arco, se procede a la selección del electrodo más adecuado, considerando tanto las propiedades del material como las exigencias de resistencia para las uniones proyectadas. Las uniones se llevan a cabo utilizando soldadura WEST ARCO AWS E6011 de 1/8" a 90 Amperios, especialmente diseñada para la soldadura de aceros al carbono. Es necesario recalcar que el uso del electrodo es esencial en este proceso gracias al recubrimiento de la varilla metálica. Este revestimiento desempeña un papel fundamental al determinar las características específicas de la unión. A diferencia de los métodos de soldadura mig-tig, este electrodo produce gases que actúan como agentes protectores durante el proceso de soldadura. A su vez el núcleo del electrodo se transfiere al metal a soldar mediante un arco eléctrico generado por la corriente y la escoria generada durante este proceso cumple la función crucial de proteger el metal depositado mientras se solidifica.

La designación del electrodo se desglosa con significativa precisión: la "E" denota electrodo, el "60" indica una resistencia a la tracción de 60.000 libras por pulgada cuadrada. El "1" implica que la soldadura puede ejecutarse en cualquier posición: plana, horizontal, vertical o elevada. El último "1" en la designación indica la composición, especificando que se trata de un electrodo celulósico de alta penetración estabilizado con potasio. Esta elección se considera imperativa al ensamblar estructuras de acero al carbono, garantizando así la resistencia necesaria para cumplir con los estándares requeridos [98].

Según la Normativa A.W.S. (American Welding Society) Sociedad Americana de Soldadura cuenta con las siguientes propiedades [99]:

Tabla 2. Propiedades mecánicas soldadura arco eléctrico

PROPIEDADES MECÁNICAS SEGÚN A.W. S	
Resistencia a la Tensión	430 MPa (62.300 psi)
Límite Elástico	330 MPa (48.000 psi)
Elongación	22%
Impacto a -30° C en probetas Charpy V – Notch	27 Joules



Figura 41. Utilización de soldadura de arco eléctrico
Fuente: Autores

Una vez terminadas las uniones como se aprecia en la **Figura 41**, se verifican medidas, se retiran impurezas, se masilla (de ser necesario) y se procede a lijar totalmente la estructura, una vez se termina de pulir, se le aplican 3 capas de pintura anticorrosiva color blanco para proteger la estructura ayudando a prevenir la oxidación de la estructura y permitiendo servir como base para la aplicación de la pintura que llevará como tono principal.



Figura 42. Aplicación de varias capas de anticorrosivo

Fuente: Autores

Dadas sus características asociadas a proteger superficies metálicas, ser resistente al agua y de buena durabilidad, se procede a pintar la estructura **Figura 42** con pintura a base de aceite de color amarillo, color que según la psicología del color y la forma está relacionado con el sol, transmite alegría y vitalidad. Sumado a que el dispositivo necesitaba un tono llamativo que captará la atención del paciente y del personal que operará el dispositivo [100], [101].



Figura 43. Estructura con pintura amarilla - color final

Fuente: Autores

Luego del secado y curado de la pintura **Figura 43**, se procede a ensamblar las bases de soporte del dispositivo con carcasas de fijación de tensión unidos a rodamientos autoalineables, mejor conocidas como chumaceras, construidas a base de Hierro colado el cual aparenta fragilidad, pero su construcción tipo esponja absorbe mejor las vibraciones sin afectar las piezas adjuntas, con sus respectivos ejes de acero grado ingeniería con aplicaciones universales 1045 de 7/8 y 3/4 [102], es un acero ampliamente utilizado en la industria de automoción en componentes que requieran tenacidad y dureza, sumado a tornillos y tuercas Grado 5 o ASTM A449 [103], éste acero al carbono con aleación media es tratado térmicamente para aplicaciones de ingeniería en general.

El sistema de elevación está desarrollado específicamente para levantar cargas utilizando un Motor reductor, DC de 12V a 50W y 6.0 Nm de Torque [104] resultando en un consumo de 4.1 Amperios con resistencia del embobinado de 2.9 Ohm acoplado a un sistema de engranaje sinfín y piñón dentado (El tornillo sinfín puede mover el piñón, pero el piñón no puede mover el tornillo sinfín; impidiendo que el sistema sea manipulado mecánicamente) acoplado a una caja reductora con relación 3:1, brindando la fuerza suficiente para superar la inercia y mover una varilla roscada de

acero 4140 grado B7, [105], material desarrollado para resistir altas temperaturas, presión y corrosión, logrando un avance de $1 \text{ grado}/10.8 \text{ seg} = 5.55 \text{ grados}/\text{min}$

Fusibles eléctricos en la fuente principal aseguran la protección ante sobrecargas de las tarjetas lógicas y de potencia, como fusible mecánico, encontramos una polea de transmisión en la caja reductora que se reventará si el sistema de elevación fallara o superara los límites para lo que fue desarrollado sumado a un botón de paro de emergencia que pausará toda la operación eléctrica del dispositivo garantizando que se encuentre en cero las fuerzas mecánicas/inercia aplicadas por los actuadores, en conjunto el sistema logra levantar la camilla con el paciente según la inclinación requerida por el personal calificado, de ahí la robustez en el desarrollo del sistema elevador y los soportes principales.

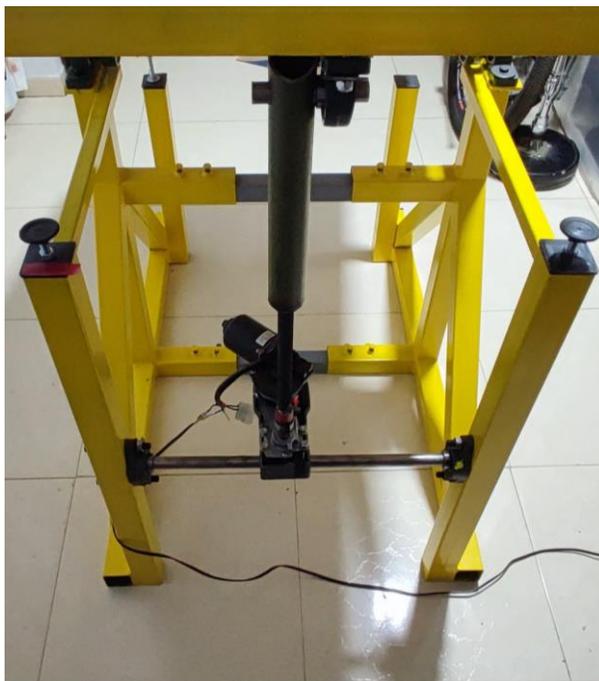


Figura 44. Imagen real sistema de elevación acoplado con caja reductora

Fuente: Autores

El ensamble finaliza con la calibración de los actuadores de estimulación vibratoria con las frecuencias y voltajes específicos ensamblados en encapsulados fabricados mediante impresión 3D, y posteriormente montados en el soporte amoblado (espalda y cuello) para brindar comodidad, sumado a otros actuadores que pueden ir en brazos y/o piernas dependiendo de la complejidad de cada caso, de los hemisferios

comprometidos y del manejo que determine implementar el profesional. La interfaz visual permite seleccionar 3 modos de terapia: Supino, Prono y Prono invertido, además posibilita el ángulo de inclinación en cada sesión, la intensidad vibratoria, el tiempo que durará la terapia, de ser necesario se pausará en cualquier momento si el paciente lo requiere.



Figura 45. Imagen real - Estructura modular parte robusta
Fuente: Autores

En la **Figura 44,45** se observa toda la estructura mecánica del prototipo, destacando la parte robusta del diseño. Esta imagen real proporciona una representación visual clara de los componentes y su organización, permitiendo apreciar la estabilidad y funcionalidad del prototipo en su estado actual.



Figura 46. Imagen real – Prototipo completamente ensamblada la parte mecánica y estructural

Fuente: Autores

En la **Figura 46** se presenta el prototipo final. En esta imagen, se aprecia el colchón que incorpora internamente un sistema vibratorio, el cabezal diseñado para terapias en la zona semiespinal y el soporte medio.

3.3.2. Sistema electrónico del dispositivo propuesto

El sistema electrónico es una parte crucial del prototipo, ya que controla y gestiona todas las funciones del dispositivo. La implementación de este sistema garantiza el correcto funcionamiento, mejorando así la calidad de las terapias. Se utilizó una placa Arduino como núcleo del control electrónico, acompañada de un convertidor para gestionar el sistema vibratorio. El software utilizado para programar y controlar el Arduino incluía el Arduino IDE [106], que permitía configurar y ajustar los parámetros necesarios para un funcionamiento óptimo del sistema. Los materiales primarios utilizados en esta fase fueron la placa Arduino, el convertidor, diversos sensores y

actuadores, y componentes electrónicos auxiliares que garantizan la correcta integración y operatividad del sistema completo.

CONVERTIDOR VOLTAJE DC-DC STEP-DOWN 3A LM2596 PARA SISTEMA VIBRATORIO

El mecanismo vibratorio está conectado a un módulo LM2596 Figura 49, que transforma la corriente continua (CC) de 12v a 3,3v - 3A. Esto permite controlar tanto el encendido y apagado de los motores como la regulación de la intensidad vibratoria del sistema. Inicialmente, se había previsto una placa de circuito impreso (PCB) para esta tarea, pero no podía proporcionar el amperaje necesario para el funcionamiento óptimo del sistema. Por lo tanto, se decidió incorporar el módulo LM2596 como solución definitiva.

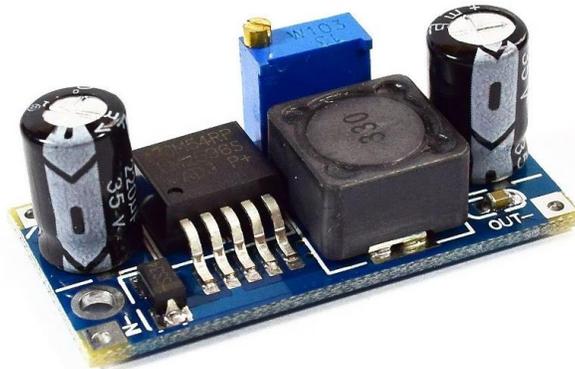


Figura 47 Convertidor LM2596 sistema vibratorio
Fuente: Autores

CONEXIÓN SISTEMA INVERSIÓN DE GIRO

La función de inversión de giro se conecta con un módulo de relés **Figura 47** que gestiona la dirección en la que el motor del sistema de elevación gira para lograr colocar la estación bipedestadora a 90 grados si el proceso de rehabilitación requiere que el paciente esté en posición bípeda. Para controlar los relés con precisión, se han integrado sensores en los ángulos extremos de inclinación y finales, especialmente cuando la cama alcanza los 180 grados. Estos sensores detectan la posición de la cama y envían una señal al correspondiente Arduino. Una vez recibida esta señal, el

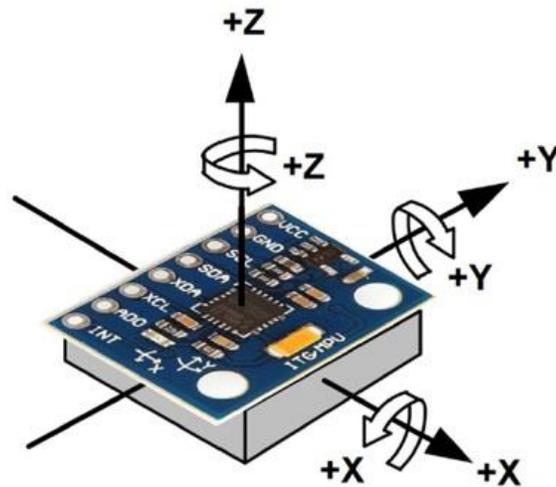


Figura 50 MPU6050 con esquemático de ejes
Fuente: Naylamp



Figura 51 Conexión pantalla OLED-MPU-Arduino
Fuente: Naylamp

Las conexiones se realizan desde el controlador Arduino al módulo MPU6050 **Figura 50, 51**, éste es una unidad de medición inercial, permite determinar el ángulo de inclinación/rotación, cuenta con un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes, posee 2 protocolos de comunicación (SPI - I2C) y un procesador interno [106], funciona a 5V con un consumo de 3.5mA. Ideal para usarse en la medición de los grados de rotación de la camilla y no sobrepasar la inclinación de seguridad (21 grados) los cuales serán impresos en la pantalla SSD1306 OLED, la cual tiene un tamaño de 0.96 pulgadas, una resolución de 128X64 pixeles, monocromática con comunicación I2C la cual cuenta con 4 pines, funciona a 5V y consume 16mA, ésta permite navegar en el menú desarrollado específicamente para realizar las terapias programadas (Supino, Prono y Prono invertido)

CONTROL MANUAL – PARO DE EMERGENCIA

El sistema de control manual **Figura 52** se implementa con el objetivo de brindar seguridad al fisioterapeuta durante el tratamiento, permitiéndole ajustar la inclinación de la camilla a un ángulo diferente a los preestablecidos en la programación. Esto facilita la autonomía del profesional y le permite tomar decisiones clínicas individualizadas para cada paciente.

1. Activación del control manual:

- Para activar el control manual, se debe presionar el botón de paro de emergencia. Esta acción desactiva todos los relés del sistema electrónico, evitando cortocircuitos y garantizando la seguridad durante la operación manual.
- Adicionalmente, se deben presionar simultáneamente dos botones: uno ubicado a un costado del panel de control y el botón de subir o bajar la camilla. Esta medida de seguridad evita la activación accidental del control manual durante la ejecución de un programa preestablecido y como una medida de seguridad para evitar que el fisioterapeuta realice dos acciones al mismo tiempo y pueda ocurrir un accidente

2. Control de la inclinación:

- Una vez activado el control manual, el fisioterapeuta puede ajustar la inclinación de la camilla utilizando los botones de subir y bajar.
- Estos botones permiten un control preciso y gradual de la inclinación, permitiendo al fisioterapeuta encontrar la posición óptima para cada paciente y tratamiento.

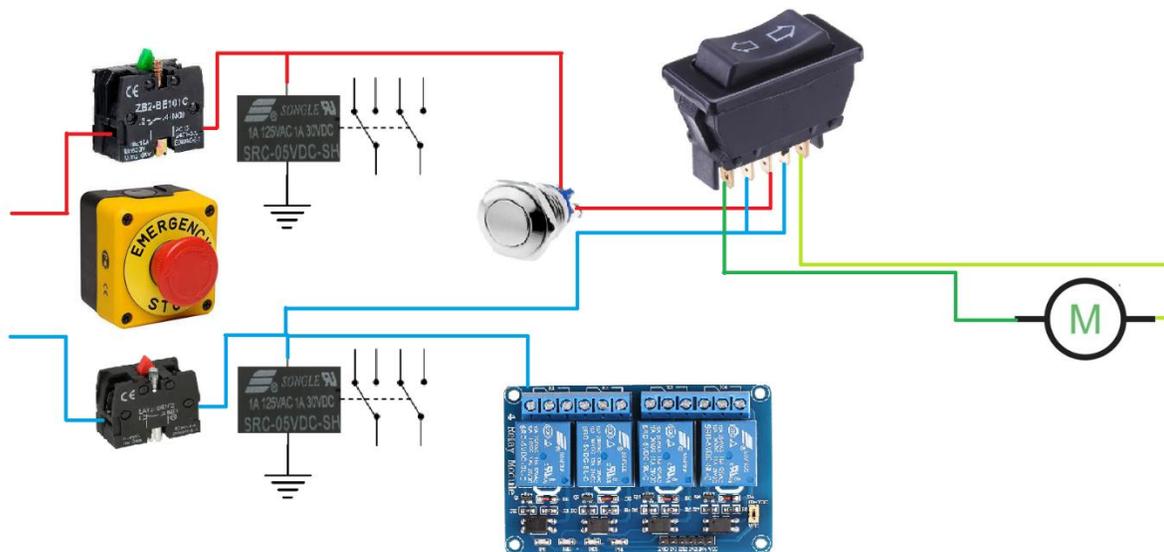


Figura 52 Esquema de conexión control de elevación manual

Fuente: Autores

CONEXIÓN SISTEMA PULSADORES TABLERO DE CONTROL

El sistema de pulsadores para la placa de control **Figura 53** se implementa debido a la imposibilidad de cambiar la pantalla OLED instalada en el prototipo por otra táctil con otras características y otras configuraciones en cuanto a pines de conexión ya que el controlador (Arduino one) se quedaría corto para el proyecto al requerir entradas relacionadas con la posición de la camilla y salidas para la activación de los actuadores. La ejecución del montaje primario a nivel estructural y la adquisición de actuadores para los requerimientos del sistema de elevación y vibración imposibilitaron el cambio de controlador ya que el presupuesto se ajustó al controlador ya adquirido, optando por la implementación de cuatro pulsadores para interactuar/navegar en el menú, que muestra en la pantalla el nombre del dispositivo/prototipo y las tres terapias primarias a ejecutar (supino, prono, prono invertido) permitiendo subir, bajar, entrar, atrás como lo muestra la **Figura 54**. Al seleccionar la terapia a realizar, se mostrará en la pantalla la terapia y se activarán los actuadores programados durante el tiempo programado, el botón de retroceso permite salir del submenú e ir al menú principal permitiendo continuar con la selección de otra terapia.

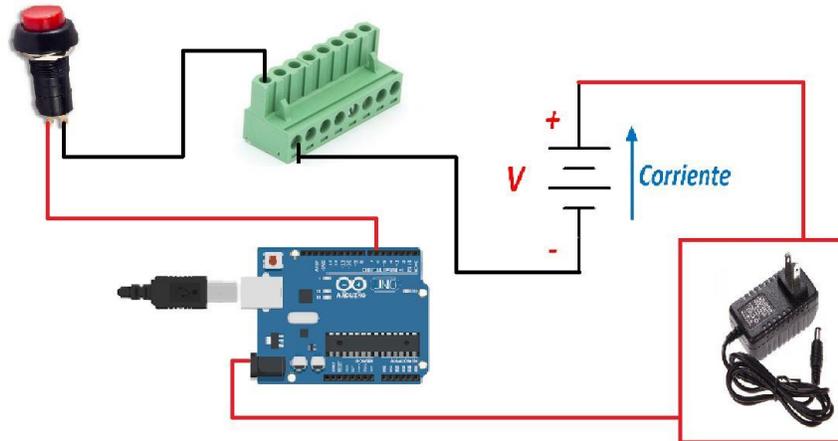


Figura 53 Sistema conexión pulsadores con Arduino
Fuente: Autores



Figura 54 Tablero de control proyecto VibroGym KIDS
Fuente: Autores

CONEXIÓN SISTEMA DE PROTECCIÓN ELÉCTRICO – CAJA DE FUSIBLES

El sistema de protección eléctrica **Figura 55** dispone de cuatro fusibles de 10 amperios situados junto a la fuente; el primero sirve de protección de la fuente de alimentación inicial de 110 VAC que alimenta los transformadores de AC a DC a través de un interruptor iluminado desde el panel principal que sirve de indicador de alimentación piloto y asegura los siguientes elementos: Fuente de alimentación de 120 VAC a

12VDC - 40 Amperios y un transformador de 120 VAC a 5 VDC - 5 Amperios, el segundo fusible protege el sistema de relés (módulo MD-09 C) del sistema de polipasto controlado por un Arduino, el tercer fusible protege el sistema de polipasto manual que se activa mediante una combinación de pulsadores a partir de la activación de la parada de emergencia, el cuarto y último fusible protege un convertidor de tensión DC-DC (LM2596) que transforma 12 VDC a 3.3 VDC - 3 Amperios, voltaje y amperaje necesarios para alimentar los motores del sistema de vibración (encapsulados) activados por módulos de relés (MD-09 C) activados únicamente desde el controlador central Arduino uno.

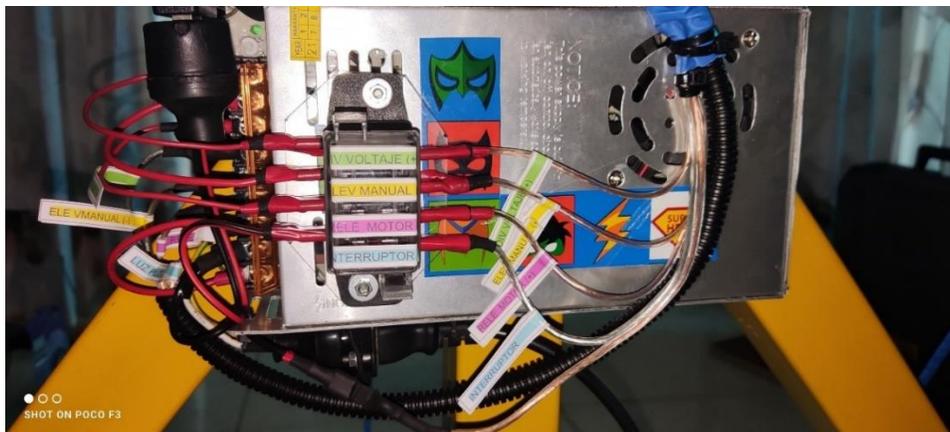


Figura 55 Tablero eléctrico proyecto VibroGym KIDS

Fuente: Autores

3.3.3. Desarrollo software de VibroGym KIDS

El prototipo mecatrónico VibroGym Kids está diseñado para la rehabilitación infantil en casa. Este dispositivo integra componentes mecánicos, electrónicos y software para ofrecer terapias de rehabilitación en niños con parálisis cerebral infantil. El software del VibroGym Kids es clave para su funcionamiento, permitiendo programar ejercicios, monitorear el progreso en tiempo real de los ángulos de inclinación y proporcionar retroalimentación inmediata de los sensores de posicionamiento. Este software se adapta a las necesidades individuales de cada niño según requerimientos del experto, haciendo que las sesiones sean personalizadas y efectivas.

A continuación, se describen las etapas del funcionamiento del software del prototipo VibroGym Kids **Figura 56:**

Para comenzar, conecta el dispositivo y presiona el botón de encendido (POWER) para activar el controlador y encender la pantalla del panel de control. Una vez encendida, la pantalla mostrará un mensaje de bienvenida "VibroGym Kids" seguido de un menú principal. En este menú, podrás seleccionar entre las diferentes terapias disponibles: Terapia Supino, Terapia Prono y Terapia Prono Invertido. Las cuales han sido descritas anteriormente

Para seleccionar el programa de rehabilitación, el panel de control cuenta con cuatro botones: arriba, abajo, selección y atrás. Estos botones permiten navegar por el menú y escoger la terapia deseada. A continuación, se describe el funcionamiento de cada terapia según su lógica de programación.

La terapia en posición supina (acostado boca arriba) es importante para niños con parálisis cerebral, ya que ayuda a desarrollar el control del tronco y la cabeza, previene contracturas y deformidades musculares, estimula la entrada de estímulos sensoriales, fortalece los músculos del tronco y las extremidades, facilita movimientos específicos como levantar la cabeza o mover las extremidades, y mejora la capacidad respiratoria al expandir el tórax. Esta posición proporciona una base estable y segura para que los niños con parálisis cerebral desarrollen habilidades motoras y funcionales [108].

Para ejecutar esta terapia, el sensor F1 debe estar activado, lo que indica que la cama está en posición horizontal. Si la cama no está en esta posición, se ejecuta el código que la lleva a la posición "Cero máquina". Una vez que el sensor F1 detecta la posición correcta, los vibradores de toda la camilla se encienden para ayudar a disminuir el nivel de espasticidad durante la terapia. Es importante aclarar que el panel de control posee un potenciómetro que permite variar manualmente la potencia de los vibradores. Cuando la terapia termina, se apagan los vibradores y vuelve a aparecer el menú principal en la pantalla del panel de control para seleccionar otra terapia.

Todas las terapias tienen un tiempo de duración de 10 minutos, permitiendo aumentar este tiempo una vez termine la sesión, podrá volver a seleccionar el mismo programa para ampliar su rango de duración. Durante cada terapia, la pantalla muestra el ángulo de inclinación actual de la camilla, gracias al componente electrónico MPU6050 que se encuentra en la parte inferior de la camilla. El MPU6050 es un módulo de sensores

inercial que integra un acelerómetro y un giroscopio en un solo chip, permitiendo la medición de la aceleración lineal y la velocidad angular en tres ejes (X, Y, Z)[109].

La terapia en posición prono (acostado angularmente boca abajo con la cabeza en el extremo superior) mejor conocida como decúbito prono se utiliza en niños con parálisis cerebral con el fin de estimular las extremidades superiores e inferiores desde la parte posterior, impulsando el apoyo de los brazos y piernas, desarrollando control sobre el cuello mediante el levantamiento de la cabeza, desde esta posición el niño iniciará la educación de reflejos de equilibrio, todo dependerá de la complejidad de cada caso y los hemisferios comprometidos ya que algunos métodos y ejercicios requerirán mayor tiempo de ejecución priorizando el desarrollo motor y luego los que permitan que el paciente avance con actividades que ejecute relativamente bien. Cabe resaltar que el éxito de las terapias dependerá de la perseverancia y continuidad en conjunto con los padres quienes son los que en casa apoyarán los tratamientos sugeridos por el profesional tratante [110].

Para ejecutar esta terapia, la máquina debe detectar si el sensor F1 o el sensor F2 esta activado, lo que indica que la cama está en posición horizontal o inclinada, si no se detecta ninguno de los dos sensores se ejecuta el código que la lleva a la posición "Cero máquina" e iniciará las maniobras para llevar la camilla a la inclinación adecuada, una vez que la camilla está en la posición F2 el controlador enciende los vibradores de toda la camilla ayudando a disminuir el nivel de espasticidad durante la terapia. El operario podrá aumentar o disminuir la intensidad del sistema de vibración y después del tiempo programado, la terapia termina, se apagan los vibradores y vuelve a aparecer el menú principal en la pantalla del panel de control para seleccionar otra terapia.

La terapia en posición prono invertido (acostado angularmente boca abajo con la cabeza en el extremo inferior) mejor conocida como decúbito prono invertido se utiliza en niños con parálisis cerebral con el fin de promover el movimiento de arrastre activo del paciente integrando brazos, hombros, cadera y miembros inferiores, apoyando al paciente desde la cadera y hombros, desde esta posición el paciente podrá extender los brazos y rotar los hombros favoreciendo la lateralización de cuello, también le permitirá ejercitar las piernas al realizar movimientos de avance/gateo apoyado en las

rodillas estimulando la musculatura aductora. Este ejercicio permite descansar y crear una descarga de peso que comúnmente está centralizado en la cadera [111].

Por último, al seleccionar ésta terapia, la máquina deberá detectar si el sensor F1 o el sensor F2 está activado, lo que indica que la cama está en posición horizontal o inclinada, si no se detecta ninguno de los dos sensores se ejecuta el código que la lleva a la posición "Cero máquina" e iniciará las maniobras para llevar la camilla a la inclinación adecuada, una vez que la camilla está en la posición F2 el controlador enciende los vibradores del soporte del cuello ayudando a disminuir el nivel de espasticidad focalizado en esa zona. El operario podrá aumentar o disminuir la intensidad del sistema de vibración y después del tiempo programado, la terapia termina, se apagan los vibradores y vuelve a aparecer el menú principal en la pantalla del panel de control para seleccionar otra terapia.

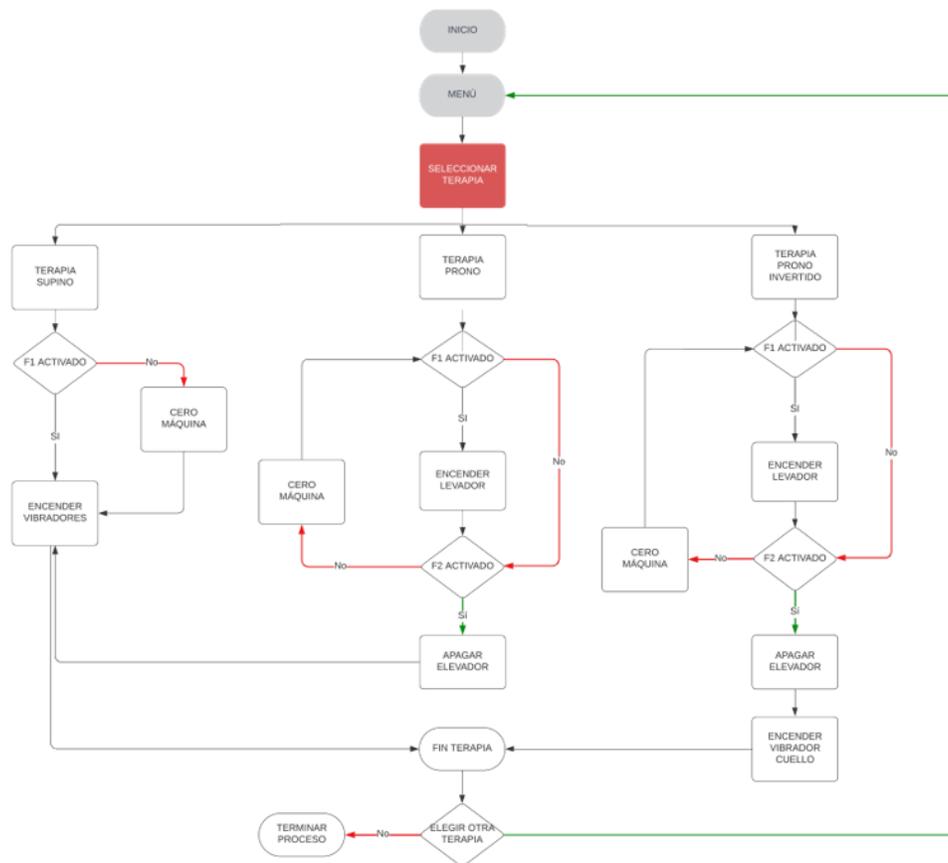


Figura 56 Diagrama de flujo - Programación VibroGym Kids
Fuente: Autores

3.3.4. Creación de página web relacionada con el dispositivo propuesto

Se creó una página web, **Figura 57**, para dar a conocer el prototipo de forma más dinámica. Permite un acercamiento a las características y cualidades que hacen de VibroGym KIDS un gimnasio ideal para apoyar las terapias físicas de niños con parálisis cerebral desde casa. En esta página también hay un espacio diseñado para ayudar a resolver dudas sobre el funcionamiento del prototipo, donde se pueden dejar recomendaciones, felicitaciones o inquietudes.



Figura 57. Inicio de sesión en la página web

Fuente: Autores

La creación de la página web comienza con la recopilación de requisitos **Figura 58**: dar a conocer el prototipo VibroGym Kids a través de una plataforma web, proporcionar información detallada sobre los beneficios y características del producto, facilitar la comunicación con clientes potenciales y generar interés en la comunidad médica y de rehabilitación. A partir de estos requisitos, se define el público objetivo: padres de niños con parálisis cerebral, profesionales sanitarios (médicos, fisioterapeutas, terapeutas ocupacionales), investigadores y académicos.



Figura 58 Orden para realización de levantamiento de requerimientos para software

Fuente: Asana

El contenido principal del sitio incluirá: información sobre el prototipo VibroGym Kids, con detalles de sus características, ventajas y funcionamiento; una sección de preguntas frecuentes; una galería de fotos y vídeos; y un formulario de contacto para recibir más información o solicitar una demostración.

Seguidamente, se define la funcionalidad de la página: diseño responsive **Figura 59** que se adapta a diferentes dispositivos (ordenadores, tablets, smartphones), navegación sencilla e intuitiva, y un sistema de comentarios para que los usuarios puedan compartir sus experiencias [112]. El diseño web responsive es una técnica de diseño y desarrollo web que permite que un sitio web se adapte y se vea bien en una variedad de dispositivos y tamaños de pantalla, desde ordenadores de escritorio hasta tablets y smartphones. El objetivo principal del diseño responsive es ofrecer una experiencia de usuario óptima, independientemente del dispositivo utilizado para acceder al sitio web.

```

/* Diseño para celulares */
#columna1, #columna2, #columna3 {
    float:none;
    width:100%;
}

/* Diseño para tabletas */
@media screen and (min-width: 800px) {
    #columna1, #columna2 {
        float:left;
        width:50%;
    }
}

/* Diseño para PC */
@media screen and (min-width: 1025px) {
    #columna1, #columna2, #columna3 {
        float:left;
        width:33%;
    }
}

```

Figura 59 Código diseño responsive HTML y CSS

Fuente: Autores

Finalmente, se procede a la realización de la página web con una estructura HTML **Figura 59**. Se comienza escribiendo la estructura básica de la página utilizando etiquetas HTML como <html>, <head>, y <body>. Dentro de <head>, se agrega el título de la página con la etiqueta <title> y metadatos importantes como <meta charset="UTF-8"> para la codificación de caracteres. En <body>, se utilizan etiquetas como <h1> a <h6> para crear encabezados y <p> para párrafos de texto. Para crear enlaces a otras páginas o recursos web, se emplea la etiqueta <a> con el atributo href para especificar la URL. Para incluir imágenes, se utiliza la etiqueta con atributos como src para indicar la ruta de la imagen y alt para establecer un texto alternativo. Finalmente, se guarda el archivo con extensión .html y se procede a abrir en un navegador.

```

1 <?php
2 // Your code here!
3 <!DOCTYPE html>
4 <html lang="es">
5 <head>
6   <meta charset="UTF-8">
7   <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
8   <title>Vibro Gym Kids</title>
9   <style>
10    body {
11      font-family: Arial, sans-serif;
12      margin: 0;
13      padding: 0;
14    }
15    header {
16      background-color: #f8b400;
17      color: white;
18      padding: 10px 0;
19      text-align: center;
20    }
21    nav {
22      background-color: #333;
23    }
24    nav ul {
25      list-style-type: none;
26      padding: 0;
27      margin: 0;
28      display: flex;
29      justify-content: center;
30    }

```

Figura 60 Código inicio página web VibroGym Kids

Fuente: Autores

Capítulo 4

Resultados y validaciones

En este capítulo se expondrá el proceso y desarrollo de las validaciones realizadas sobre el prototipo VibroGym Kids. Se pretende observar los resultados, aspectos de mejora y opiniones sobre el prototipo según expertos en neuropediatría y fisioterapeutas especializados en enfermedades con enfoque neural.

4.1 Diseño del experimento

Se utilizaron tres metodologías para evaluar el prototipo de máquina de bipedestación: El análisis de la marcha, la evaluación del equilibrio y la evaluación funcional. El análisis de la marcha es un método para medir y evaluar el movimiento humano, principalmente cómo caminan las personas. Puede utilizarse para evaluar la eficacia de un prototipo de máquina bípoda de bipedestación midiendo los cambios en los parámetros de la marcha, como la longitud de la zancada, la amplitud de la zancada y la velocidad de la marcha. La evaluación del equilibrio es el proceso de evaluar la capacidad de una persona para mantener el equilibrio. Puede utilizarse para evaluar la eficacia de un prototipo de bipedestador midiendo los cambios en los parámetros del equilibrio, como el balanceo postural y el centro de presión. Por último, la valoración funcional evalúa la capacidad de una persona para realizar actividades de la vida diaria (AVD). Puede utilizarse para evaluar la eficacia de un prototipo de bipedestador midiendo los cambios en la capacidad para realizar AVD, como ponerse de pie, transferirse y caminar.

4.1.1 Encuesta de validación

Se diseñó una encuesta para el proceso de validación y se añadieron preguntas sobre el impacto y la aceptación del prototipo, teniendo en cuenta el requisito de mitigar la espasticidad en niños con parálisis cerebral.

La población objetivo de la encuesta eran los fisioterapeutas que evaluarían el prototipo; algunas preguntas se basaban en su satisfacción al utilizar el dispositivo, lo amigable que era la interfaz, los ángulos de inclinación para las terapias y las sugerencias para mejorar las características de funcionamiento y la eficacia del prototipo.

4.2 Ejecución experimental

Una vez determinadas las tres metodologías para determinar la eficacia y funcionalidad del prototipo, se realizó una actividad el día 18 de abril a las 3:00 pm en la Fundación Universitaria María Cano de Popayán **Figura 61**, donde participaron diferentes fisioterapeutas y neuropediatras para evaluar el prototipo en dos tipos de pacientes: El primer grupo de pacientes (GRUPO A) estudiantes de estatura media, no mayor a 1,60 (niños entre 6 y 8 años) y el segundo grupo de pacientes (GRUPO B) con parálisis cerebral en menor grado, con limitación de movimiento superior o inferior (niños entre 5 y 8 años). El experimento realizado en ambos grupos de pacientes fue el mismo, el cual consistió en trasladar al paciente de una silla a la estación de bipedestación (VibroGym Kids) para determinar si la altura del prototipo era la adecuada; en ambos grupos, el experto en salud logró colocar al paciente en la estación de bipedestación; sin embargo, se determinó que la altura de la estación debería ser modificable ya que en algunas ocasiones fue difícil colocar al paciente sin la ayuda de otro personal.



Figura 61 Presentación del prototipo a expertos en fisioterapia
Fuente: Autores

Una vez que el paciente se encontraba sobre el pedestal, se evaluó la ergonomía de la camilla, la anchura de las piernas del paciente con apoyo en el centro y la seguridad de los arneses para continuar con el experimento. Dado que el prototipo debía cumplir con la funcionalidad de una bipedestadora, el objetivo final fue colocar al paciente de pie para realizar su proceso de rehabilitación, así como activar los módulos vibratorios para lograr de esta manera disminuir los niveles de espasticidad en los pacientes, permitiendo que el proceso de rehabilitación sea mucho más sencillo. En esta línea, es fundamental indicar que los módulos vibratorios fueron capaces de ajustar la potencia de la vibración según las recomendaciones del fisioterapeuta ya que, en algunos pacientes, más de 60hz podría ser perjudicial a nivel neuronal.

Inmediatamente después de que el paciente estuviera de pie, apoyado en el prototipo, los fisioterapeutas evaluaron la marcha del paciente para validar la seguridad y comodidad del prototipo. Teniendo en cuenta que VibroGym Kids está diseñado para terapias domiciliarias, su nivel de seguridad debe ser bastante alto para evitar que el paciente se fracture cuando esté en posición bípeda y para garantizar que el paciente pueda realizar las diferentes AVD. Por último, se colocó al paciente en posición supina y se evaluó la estabilidad del prototipo cuando se bajó la camilla.

4.3 Resultados de las encuestas

Durante el experimento, se pidió a los estudiantes de fisioterapia que escanean un código QR que les redirige a la página web del prototipo donde podían dejar sus comentarios, sugerencias e inquietudes con base a una encuesta para evaluar VibroGym Kids.

A continuación, los gráficos de las preguntas dicotómicas de la encuesta realizada a 40 personas **Figura 62** en las cuales sus respuestas eran SI o NO para evaluar el prototipo. Analizando los gráficos se puede concluir que más del 50 % de las personas que evaluaron el prototipo consideran que VibroGym Kids: cumple con el propósito para el que fue diseñado, en este caso ayudar a disminuir el nivel de espasticidad en niños con parálisis cerebral y apoyo fundamental en terapias de rehabilitación, además, consideran que su interfaz y modo de uso del dispositivo es intuitivo por lo cual, creen que es pertinente para recomendarlo con otros colegas o familiar que tengas niños con esta condición.

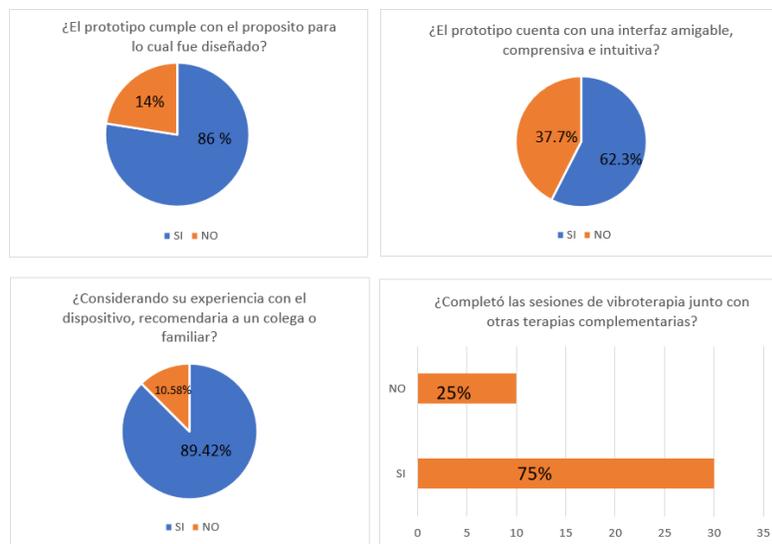


Figura 62 Gráfico de resultados preguntas dicotómicas encuesta de satisfacción VibroGym Kids

Fuente: Autores

Una vez finalizada la fase de validación, los fisioterapeutas dieron sus opiniones y recomendaciones de mejora en la encuesta de satisfacción en las preguntas de texto abierto, las recomendaciones principales fueron:

1. VibroGym Kids como estación bipedestadora cumple con el propósito, sin embargo, sugirieron ampliar el rango de edad de la población objetivo, y de igual manera las medidas que debe tener el prototipo, esto debido a que ambos grupos de pacientes evaluados rebasaron los parámetros que se han acotado en el estudio de esfuerzos y aun así se logró ver un alto nivel de seguridad.
2. La altura de la cama debe ser ajustable, es decir, permitir colocar al paciente en la estación desde una altura por debajo de la cadera del fisioterapeuta y posteriormente ajustar la altura de la estación hasta donde el fisioterapeuta considere adecuado, esto con el fin de cuidar las posturas y esfuerzos que el fisioterapeuta debe realizar al cargar al paciente.
3. Realizar un cambio en la pantalla del panel de control, ya que su tamaño dificultaba la visualización de las opciones del menú.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

El capítulo final del proyecto aborda las conclusiones obtenidas y las proyecciones de trabajo futuro en el desarrollo de VibroGym Kids. Se busca integrar soluciones tecnológicas de vanguardia, como la implementación de inteligencia artificial para la predicción y simulación de los grados de espasticidad en tiempo real, elementos mecatrónicos para un sistema de seguridad más preciso y actuadores más potentes, todo esto para facilitar el uso del dispositivo por parte del personal a cargo y reducir los tiempos de terapia.

5.1 Conclusiones

El proyecto consiguió diseñar y construir un prototipo funcional, VibroGym Kids, para apoyar la rehabilitación de niños con parálisis cerebral espástica. Se siguieron metodologías de diseño mecatrónico y se aplicaron herramientas CAD y CAE para garantizar la resistencia, seguridad y comodidad del dispositivo. Las pruebas y validaciones realizadas por expertos en neuropediatría y fisioterapeutas confirmaron la eficacia del prototipo. Se destacó la necesidad de ajustar la altura del dispositivo para facilitar la transferencia del paciente, y se sugirieron mejoras en ergonomía y seguridad. VibroGym Kids demostró ser una valiosa herramienta para la terapia a domicilio, ya que ofrece adaptabilidad a diversas terapias y mejora la calidad de vida de los pacientes. La inclusión de un sistema vibratorio inspirado en los mandos de Xbox añadió un elemento innovador al tratamiento de la espasticidad.

La bibliografía indica que la investigación en parálisis cerebral está intrínsecamente orientada a las necesidades y la calidad de vida de los pacientes y sus familias. El desarrollo de nuevas terapias y tecnologías, como VibroGym Kids, refleja un compromiso continuo con la mejora de las funciones motoras, cognitivas y comunicativas de las personas afectadas, en línea con las tendencias y prioridades actuales de la rehabilitación pediátrica.

La construcción del prototipo permitió utilizar de manera integral todos los recursos de la ingeniería mecatrónica, abarcando desde la realización del diseño CAD y el análisis CAE, hasta la evaluación de materiales de ingeniería para garantizar la seguridad del prototipo Vibrogym Kids. Además, se llevaron a cabo cálculos matemáticos para el diseño de la caja reductora, asegurando que el motor tuviera suficiente potencia para elevar la camilla con el paciente. También se implementaron configuraciones electrónicas para el sistema vibratorio y se desarrolló el software para la automatización del dispositivo. La integración de diversas áreas de la ingeniería mecatrónica permitió lograr un producto funcional y seguro. En este sentido, el éxito del desarrollo de VibroGym Kids demuestra la importancia de un enfoque interdisciplinar, que combina conocimientos de diversos campos como la mecatrónica, la ingeniería biomédica, la pediatría y la fisioterapia. Esta colaboración entre ingenieros, profesionales médicos e investigadores fue crucial para garantizar que el dispositivo respondiera a las necesidades y requisitos específicos de la población destinataria.

Otro elemento de importancia derivado de la investigación tiene que ver con que el prototipo inicial de VibroGym Kids ha tenido resultados prometedores, pero todavía hay margen para más investigación y desarrollo. La realización de ensayos clínicos a mayor escala con una población de pacientes más diversa podría aportar información valiosa sobre la eficacia del dispositivo y su potencial de personalización en función de las necesidades individuales. Además, explorar la integración de sensores avanzados, análisis de datos y algoritmos de aprendizaje automático podría mejorar las capacidades del dispositivo en el seguimiento y la adaptación al progreso de cada paciente.

Finalmente, se recomienda seguir desarrollando el prototipo, teniendo en cuenta las sugerencias de los profesionales para mejorar la funcionalidad y la experiencia del usuario. Además, se proponen estudios a largo plazo para evaluar los efectos terapéuticos del dispositivo en una muestra mayor de pacientes, así como el cambio del controlador permitiendo elementos vibratorios de mayor potencia y el uso de una pantalla más grande.

5.2 Trabajos futuros

El prototipo desarrollado es susceptible de mejoras que pueden apoyar mejor el proceso de rehabilitación de la espasticidad en niños, por lo que tecnologías novedosas podrían ser aditivas a esta propuesta. En primer lugar, podría desarrollarse un sistema de inteligencia artificial para analizar los datos de cada paciente y personalizar las sesiones de terapia en función de sus necesidades específicas con respecto al nivel de espasticidad. La IA podría ajustar automáticamente los parámetros del dispositivo, como la intensidad de los vibradores y la posición del niño, optimizando así la eficacia del tratamiento y reduciendo la carga de trabajo del fisioterapeuta [113].

Integración de algoritmos de aprendizaje automático para supervisar la evolución del paciente y adaptar continuamente las terapias en tiempo real. El sistema podría aprender de los datos acumulados durante las sesiones para predecir y prevenir posibles complicaciones, mejorando la seguridad y eficacia del tratamiento [114].

Sustituir los actuadores actuales por modelos más avanzados y potentes que ofrezcan una mayor precisión en los movimientos y ajustes del dispositivo. Esto permitiría cambios más finos y rápidos en las posiciones supina, prona, prona invertida y bípeda, facilitando la realización de terapias más complejas que requieren mover al paciente en posición bípeda empleando el dispositivo.

Elaborar una camilla que ajuste automáticamente la altura en función del peso del paciente. Esto permitiría una mayor accesibilidad y comodidad durante las sesiones de terapia, permitiendo al fisioterapeuta mantener posturas ergonómicas que eviten el desgaste físico y mejoren la interacción con el paciente.

Lista de referencias

- [1] M. P. Suárez Avellaneda and D. F. Neira Robles, “Planificación del sistema de gestión de la calidad en Biomedics IPS EU, bajo la norma NTC 9001: 2015,” PhD Thesis, 2019.
- [2] H. D. López-Santacruz, Y. Hernández-Molinar, B. E. Martínez-Sandoval, M. Á. Rosales-Berber, and G. Torre-Delgadillo, “Estrategias terapéuticas de calidad en Odontopediatría: parálisis cerebral,” *Acta Pediátrica México*, vol. 40, no. 1, pp. 32–43, 2019.
- [3] L. F.-S. Pardo, “METODO BOBATH. PARALISIS CEREBRAL INFANTIL”.
- [4] M. Ortega-Lendínez, “Efectividad de la terapia Vojta en parálisis cerebral infantil. Una revisión sistemática,” 2014.
- [5] C. D. Arana Solorzano and D. L. Veliz Picon, “Abordaje fisioterapéutico con el método Perfetti en niños con parálisis cerebral infantil en la Institución de Educación Especializada ‘Un Nuevo Amanecer’ del cantón Babahoyo, en el periodo de junio-octubre 2023.,” B.S. thesis, Babahoyo: UTB-FCS, 2023, 2023.
- [6] C. I. E. Diaz, “y características clínicas de la parálisis cerebral infantil,” 2019.
- [7] M. I. Morales Parraga, “Conducta obstétrica ante amenaza de parto pretérmino, en gestante de 21 años más consumo de drogas.,” B.S. thesis, Babahoyo: UTB-FCS, 2021, 2021.
- [8] D. L. M. Merlo, “Prevención de las displasias de cadera a través de los programas de bipedestación en abducción en niños con parálisis cerebral diplejía espástica”.
- [9] R. Raimann and D. Aguirre, “DISPLASIA DEL DESARROLLO DE LA CADERA: TAMIZAJE Y MANEJO EN EL LACTANTE,” *Rev. Médica Clínica Las Condes*, vol. 32, no. 3, pp. 263–270, May 2021, doi: 10.1016/j.rmclc.2021.04.003.
- [10] M. L. Macias Merlo, “Prevención de las displasias de cadera mediante los programas de bipedestación en abducción en niños con parálisis cerebral diplejía espástica,” 2016.
- [11] P. Sepúlveda, J. L. Bacco, A. Cubillos, and A. Doussoulin, “Espasticidad como signo positivo de daño de motoneurona superior y su importancia en rehabilitación,” *Ces Med.*, vol. 32, no. 3, pp. 259–269, Dec. 2018, doi: 10.21615/cesmedicina.32.3.7.
- [12] M. Fernández Sánchez, A. Aza Hernández, and M. Á. Verdugo Alonso, “Modelos de atención pública a la población con daño cerebral adquirido en España: un estudio de la situación por comunidades autónomas,” *Rev. Neurol.*, vol. 74, no. 8, pp. 245–257.
- [13] J. M. Sequeiros-Chirinos *et al.*, “Diagnóstico y tratamiento de la etapa aguda del accidente cerebrovascular isquémico: Guía de práctica clínica del Seguro Social del Perú (EsSalud),” *Acta Medica Peru.*, vol. 37, no. 1, pp. 54–73, 2020.
- [14] P. Domínguez-Téllez, J. A. Moral-Muñoz, E. Casado-Fernández, A. Salazar, and D. Lucena-Antón, “Efectos de la realidad virtual sobre el equilibrio y la marcha en el ictus: revisión sistemática y metaanálisis,” *Rev NeurolEd Impr*, pp. 223–234.

- [15] C. I. E. Diaz *et al.*, "Prevalencia, factores de riesgo y características clínicas de la parálisis cerebral infantil," *Arch. Venez. Farmacol. Ter.*, vol. 38, no. 6, pp. 778–789, 2019.
- [16] A. G. B. Neira, S. P. H. Macera, W. J. Á. Ordoñez, and W. A. D. Conforme, "Traumatismo Craneoencefálico: Importancia de su prevención y tratamiento," *RECIMUNDO Rev. Científica Investig. El Conoc.*, vol. 3, no. 2, pp. 467–483, 2019.
- [17] M. A. L. Sanchez, P. G. O. Villalba, V. E. E. Pastor, A. C. P. Luna, and L. J. R. Chacón, "Neurorehabilitación en un paciente con traumatismo raquímedular cervical y su evolución," *Rev. Científica Arbitr. Multidiscip. PENTACIENCIAS- ISSN 2806-5794*, vol. 4, no. 3, pp. 55–61.
- [18] M. Moreno-Verdú, M. R. Ferreira-Sánchez, R. Cano-de la Cuerda, and C. Jiménez-Antona, "Eficacia de la realidad virtual sobre el equilibrio y la marcha en esclerosis múltiple. Revisión sistemática de ensayos controlados aleatorizados," *Rev Neurol*, vol. 68, pp. 357–368.
- [19] E. M. Vivanco Vilchez, "Tratamiento fisioterapéutico en parálisis cerebral infantil en ataxia cerebelosa," 2022.
- [20] Y. Figueroa Ferrer, H. R. Alvarez Luna, and R. Ruiz Alberdy, "Efectividad de la toxina botulínica tipo A en el tratamiento de niños con parálisis cerebral infantil," *Acta Médica Científica Cent.*, vol. 16, pp. 34–45, Mar. 2022.
- [21] M. A. M. Guerrero, B. E. C. Valencia, J. A. V. Andino, A. D. I. Perez, C. J. V. Cedeño, and J. P. D. Rodríguez, "Diagnóstico oportuno de la displasia de cadera. Enfermedad que imposibilita de por vida," *Cienc. Lat. Rev. Científica Multidiscip.*, vol. 6, no. 5, pp. 1–16.
- [22] A. Alarcón-Aguilar, P. Maycotte-González, P. Cortés-Hernández, N. E. López-Diazguerrero, and M. Königsberg, "Dinámica mitocondrial en las enfermedades neurodegenerativas," *Gac. Médica México*, vol. 155, no. 3, 2019.
- [23] F. Vivancos Matellano *et al.*, "Guía del tratamiento integral de la espasticidad," *Rev. Neurol.*, vol. 45, no. 06, p. 365, 2007, doi: 10.33588/rn.4506.2007239.
- [24] M. A. Alcocer-Gamboa, A. Ojeda-Manzano, L. J. Baqueiro-Góngora, L. E. Denis-Alcocer, M. Hattori-Hara, and A. Pacheco-Güemez, "Dosis y eficacia de la toxina botulínica en pacientes pediátricos con espasticidad," *Rev Neurol Ed Impr*, pp. 199–206, 2019.
- [25] J. D. H. Niño, K. P. P. Pedro, I. M. Cardalda, and I. M. de Oliveira, "Electroestimulación funcional para miembros superiores tras el accidente cerebrovascular: una revisión sistemática," *Retos Nuevas Tend. En Educ. Física Deporte Recreación*, no. 46, pp. 1073–1083, 2022.
- [26] P. L. Castaño, M. C. Gelves, and D. P. Urazan, "Abordaje de un caso de parálisis cerebral espástica nivel v mediante el concepto Bobath," *Fisioterapia*, vol. 41, no. 4, pp. 242–246, 2019.
- [27] "Tratamiento con toxina botulínica en niños con parálisis cerebral espástica.," *Rev. MEDICA Urug.*, vol. 37, no. 3, Sep. 2021, doi: 10.29193/RMU.37.3.2.
- [28] L. Quevedo Florez, D. Nariño Gonzalez, L. G. Aguiar Martínez, E. Salazar Ibarra, and others, "Botulismo iatrogénico en paciente con distonía cervical: Reporte de caso," 2016.
- [29] F. C. Pellegrino, "Botulismo," 2016.

- [30] P. R. Sada, L. P. García, I. G. Antía, and A. G. Macías, “Rabdomiólisis asociada a electroestimulación muscular,” *Galicla Clínica*, vol. 76, no. 4, pp. 188–188, 2015.
- [31] A. Gupta M. ., Arora, S. ., & Gupta, “Vibroterapia para la espasticidad en parálisis cerebral: una revisión sistemática,” *J. Phys. Ther. Sci.*, vol. 31, no. 1, pp. 27–34, 2019, doi: 10.1589/jpts.26.821.
- [32] A. Aquino D. ., Sánchez, M. ., & Rodríguez, “Espasticidad en parálisis cerebral: revisión sistemática de la evidencia,” *Rev. Neurol.*, vol. 66, no. 4, pp. 228–235, 2018, doi: 10.33588/S0024-52422018000400004.
- [33] P. P. Argüelles, “Parálisis cerebral infantil”.
- [34] F. Bethoux, “Spasticity management after stroke,” *Phys. Med. Rehabil. Clin.*, vol. 26, no. 4, pp. 625–639, 2015.
- [35] S. M. Elbasiouny, D. Moroz, M. M. Bakr, and V. K. Mushahwar, “Management of spasticity after spinal cord injury: current techniques and future directions,” *Neurorehabil. Neural Repair*, vol. 24, no. 1, pp. 23–33, 2010.
- [36] H. Hefter, W. H. Jost, A. Reissig, B. Zakine, A. M. Bakheit, and J. Wissel, “Classification of posture in poststroke upper limb spasticity: a potential decision tool for botulinum toxin A treatment?,” *Int. J. Rehabil. Res.*, vol. 35, no. 3, pp. 227–233, 2012.
- [37] J. C. G. Vega, M. I. Ocampo-Navia, and J. C. A. González, “Espasticidad,” *Univ. Medica*, vol. 62, no. 1, 2021.
- [38] J. C. Acevedo, J. L. Pardo, and E. Jimenez Hakim, “Secuelas espasticas de las enfermedades neurologicas: La necesidad de brindar una mejoría funcional con una calidad de vida mejor,” *Acta Méd Colomb*, pp. 75–83, 2000.
- [39] H. K. Graham *et al.*, “Cerebral palsy (Primer),” *Nat. Rev. Dis. Primer*, vol. 2, no. 1, 2016.
- [40] Rehagirona, “Rehagirona: productos de apoyo de alta calidad para mejorar la calidad de vida de personas con necesidades especiales.” Nov. 2023. [Online]. Available: <https://www.rehagirona.com/>
- [41] K. K. Súa, M. de los Á. A. Benaprés, X. V. Estrada, and others, “Parálisis cerebral,” *Rev. Pediatría Electrónica*, vol. 11, no. 2, 2014.
- [42] C. P. SAILEMA MAITA and P. I. PUENTE HEREDIA, “LA NUTRICIÓN DE LOS NIÑOS CON PARÁLISIS CEREBRAL DE LA UNIDAD EDUCATIVA ESPECIALIZADA AMBATO DEL NIVEL DE EDUCACIÓN INICIAL IY II DEL CANTÓN AMBATO PROVINCIA DE TUNGURAHUA,” PhD Thesis, 2017.
- [43] L. C. Carazo Gutiérrez and others, “La vibroterapia y su impacto como técnica de fisioterapia en la parálisis cerebral infantil: una revisión sistemática.” 2016.
- [44] C. I. Alexander Demera and others, “Estudio estadístico retrospectivo de fracturas faciales atendidas en el servicio de Cirugía oral y maxilofacial del Hospital General de las Fuerzas Armadas no. 1 en los últimos 10 años,” B.S. thesis, Quito: USFQ, 2008, 2008.
- [45] S. E. Heredia Alejo, V. Londoño Baracaldo, and V. M. Vargas Pacheco, “Evidencia de las estrategias de fisioterapia cardiopulmonar en población pediátrica (primera infancia) con cardiopatías congénitas en la unidad de cuidados intensivos,” 2021.

- [46] J. C. J. Guerrero, P. A. C. Pineda, J. E. S. Sanmartín, and D. A. C. Imbacuán, “Displasia del desarrollo de caderas,” *RECIMUNDO Rev. Científica Investig. El Conoc.*, vol. 6, no. 4, pp. 316–326, 2022.
- [47] T. I. Canarias, “Traumatología Infantil Canarias.” Nov. 2023. [Online]. Available: <https://traumatologiainfantilcanarias.com/>
- [48] A. Aznavurian and F. A. Rebolledo, “Espasticidad: ¿Qué es y qué no es?,” *Plast. Restaur. Neurológica*, vol. 5, no. 2, pp. 152–159, 2006.
- [49] T. D. México, “Top Doctors México.” Nov. 2023. [Online]. Available: <https://www.topdoctors.mx/>
- [50] D. Rosero and F. Moreno, “Aspectos histológicos y moleculares del tendón como matriz extracelular extramuscular,” *Spiritus*, vol. 2, no. 1, pp. 29–36, 2016.
- [51] C. MICHEL, “EFECTOS DE LA VISUALIZACIÓN MOTORA COMO PARTE DEL TRATAMIENTO DE FISIOTERAPIA EN PACIENTES CON LESIÓN MEDULAR INCOMPLETA”.
- [52] G. KIDD, “REFLEJO MIOTÁTICO,” *Neurol. Para Fisioter.*, p. 71, 1989.
- [53] J. M. Oyarbide, “Grado en Fisioterapia”.
- [54] Outlift, “Outlift: Cómo Ganar Músculo.” [Online]. Available: <https://outlift.com/es/>
- [55] R. F. Calderón-Sepúlveda, “Escalas de medición de la función motora y la espasticidad en parálisis cerebral,” *Rev Mex Neuroci*, vol. 3, no. 5, pp. 285–289, 2002.
- [56] I. A. Diego, C. P. Hernández, F. M. Rueda, and R. C. de la Cuerda, “Efectos de la vibroterapia sobre el control postural, la funcionalidad y la fatiga en pacientes con esclerosis múltiple. Ensayo clínico aleatorizado,” *Neurología*, vol. 27, no. 3, pp. 143–153, 2012.
- [57] L. L. Ness and E. C. Field-Fote, “Effect of whole-body vibration on quadriceps spasticity in individuals with spastic hypertonia due to spinal cord injury.,” *Restor. Neurol. Neurosci.*, vol. 27, no. 6, pp. 621–631, 2009, doi: 10.3233/RNN-2009-0487.
- [58] E. Yiannakopoulou, “Serious and long-term adverse events associated with the therapeutic and cosmetic use of botulinum toxin,” *Pharmacology*, vol. 95, no. 1–2, pp. 65–69, 2015.
- [59] D. L. Young and L. A. Halstead, “Pyridostigmine for Reversal of Severe Sequelae From Botulinum Toxin Injection,” *J. Voice*, vol. 28, no. 6, pp. 830–834, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2014.04.010>.
- [60] M. Bunge, “El método científico,” *Metodol. Investig.*, 1969.
- [61] M. P. D. MECATRÓNICO *et al.*, “Metodología De Diseño Mecatronico. pdf”.
- [62] “Rehabilitación niños con parálisis cerebral- KitSmile,” kitsmileco. Accessed: Sep. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.kitsmile.com/kit-de-rehabiliacion-en-casa>
- [63] R. Fernández, “Análisis bibliométrico de la producción científica,” *Cienc. Hoy*, vol. 8, no. 44, pp. 60–66, 1998.
- [64] N. Donthu, S. Kumar, D. Mukherjee, N. Pandey, and W. M. Lim, “How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines,” *J. Bus. Res.*, vol. 133, pp. 285–296, 2021.

- [65] D. PERGUNTA, "Estrategia PICO para la construcción de la pregunta de investigación y la búsqueda de evidencias," *Rev Lat.-Am Enferm.*, vol. 15, no. 3, 2007.
- [66] M. Gamez Valero and others, "ANOTACIÓN SEMÁNTICA DE DATOS MEDIANTE EL MÉTODO CSV@ RDF," 2023.
- [67] J. J. Volpe, "Intracranial hemorrhage: germinal matrix-intraventricular hemorrhage of the premature infant," *Neurol. Newborn*, 2001.
- [68] N. Health and M. R. Council, "Research on cerebral palsy in Australia." 2023. [Online]. Available: <https://www.nhmrc.gov.au/about-us/news-and-events/news/research-cerebral-palsy-australia>
- [69] I. Portugal, "Efectividad de un programa de Yoga para niños con parálisis cerebral infantil espástica: protocolo de un ensayo clínico aleatorizado," 2019.
- [70] J. H. Kim, "University of Melbourne," *Melb. VIC Aust. Predlav Nakov Natl. Univ. Singap. Singap. Largescale Noun Compd. Interpret. Using Bootstrapping Web Corpus*.
- [71] H. Martin, M. Rowell, S. Reid, M. Marks, and D. Reddihough, "Cerebral palsy: what do medical students know and believe?," *J. Paediatr. Child Health*, vol. 41, no. 1–2, pp. 43–47, 2005.
- [72] E. Zarate Perez *et al.*, "Learning in Project-based Engineering Education: A bibliometric Analysis," Jan. 2022. doi: 10.18687/LACCEI2022.1.1.743.
- [73] F. Aguilar-Rebolledo *et al.*, "Toxina botulínica como tratamiento de la espasticidad y distonía en la parálisis cerebral infantil.," *Gac. Médica México*, vol. 137, no. 5, pp. 403–411, 2001.
- [74] M. Peláez Ríos, A. Benítez Feliponi, A. I. Rubio López, and J. Raya Benítez, "Eficacia combinada de la toxina botulínica y fisioterapia en el tratamiento de la parálisis cerebral infantil: una revisión sistemática," *Efic. Comb. Toxina Botulínica Fisioter. En El Trat. Parálisis Cereb. Infant. Una Revisión Sist.*, pp. 361–371, 2021.
- [75] "Roki Robotics," *Roki Robotics*. Accessed: Nov. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.rokirobotics.com>
- [76] S. Roseberry, N. Paneth, Y. Butler, and A. Pascual-Leone, "Distonia in cerebral palsy: Pathophysiology, assessment, and treatment," *Dev. Med. Child Neurol.*, vol. 58, no. 9, pp. 887–897, 2016, doi: <https://doi.org/10.1111/dmnc.12982>.
- [77] S. Singhal, "Pharmacological treatment of dystonia in cerebral palsy," *Expert Opin. Pharmacother.*, vol. 18, no. 14, pp. 1547–1556, 2017, doi: <https://doi.org/10.1080/14632099.2017.1345094>.
- [78] S. C. Chen *et al.*, "Improvement of motor function and quality of life in children with spastic cerebral palsy using a robotic BORT exoskeleton: A pilot study," *J. Rehabil. Med.*, vol. 46, no. 11, pp. 1058–1064, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrm.2014.07.017>.
- [79] B. Robotics, "Exoesqueleto BORT para parálisis cerebral." 2023. [Online]. Available: <https://techxplore.com/news/2023-01-microelectronics-remote-biological-robots.html>
- [80] V. Kumari and R. Tiwari, "Design And Implementation Of Modules Of 1-Bit ALU Using Proteus Design Suite," *J. Pharm. Negat. Results*, pp. 2548–2555, 2022.

- [81] Alamy, “V-Model Software Development Methodology Scheme Diagram Lifecycle Process Infographics Verification Validation Phase Requirement Gathering System.” 2024. [Online]. Available: <https://www.alamy.com/v-model-software-development-methodology-scheme-diagram-lifecycle-process-infographics-verification-validation-phase-requirement-gathering-system-image396522569.html>
- [82] Y. Akao, *Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design*. Productivity Press, 1990.
- [83] M. S. Peña, “QFD Construcción de la Casa de la Calidad o Matriz A-1,” *Qual. Hodie Excel. Desarro. Sosten. E Innov.*, no. 17, pp. 39–46, 1995.
- [84] O. G. Woge, C. O. G. Morán, and A. L. Chau, “Introducción al método del elemento finito: Solidworks y Matlab,” *Ideas En Cienc. Ing.*, vol. 1, no. 1, pp. 27–47, 2020.
- [85] L. E. Freire Loo and others, “Estudio de maquinabilidad de aceros al carbono utilizando un fluido de corte biodegradable y natural,” B.S. thesis, Ecuador: La Maná: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC), 2020.
- [86] V. Trifănică, A. Butean, and A. Moldoveanu, “Gamepad Vibration Methods to Help Blind People Perceive Colors,” 2015.
- [87] P. M. Delêtre, “Fisioterapeuta Centro Philes”.
- [88] J. Sampedro Vidal and others, “Efectos inmediatos de varias técnicas de fisioterapia y recuperación sobre el músculo fatigado,” 2013.
- [89] C. C. Legleu, R. Candia-Luján, L. G. D. L. Fierro, O. U. Sánchez, and K. F. Candia-Sosa, “La vibración como terapia preventiva y tratamiento del dolor muscular tardío. Una revisión sistemática,” *Arch. Med. Deporte*, vol. 33, pp. 194–199, 2016.
- [90] V. Rodríguez Pérez and others, “Efectos de la vibroterapia puntual y segmentaria sobre la calidad de vida y el estrés psicofísico en personas afectadas de discapacidad severa,” 2013.
- [91] I. A. Diego, C. P. Hernández, F. M. Rueda, and R. C. de la Cuerda, “Efectos de la vibroterapia sobre el control postural, la funcionalidad y la fatiga en pacientes con esclerosis múltiple. Ensayo clínico aleatorizado,” *Neurología*, vol. 27, no. 3, pp. 143–153, 2012.
- [92] F. RODRIGUEZ, “Perfiles estructurales,” *Univ. Nac. Auton. México Pág*, vol. 32, 2019.
- [93] “MatWeb.” MatWeb LLC, 2024. [Online]. Available: <https://www.matweb.com/index.aspx>
- [94] J. Barros, T. Ros-Yáñez, R. Colás, and Y. Houbaert, “Estudio de la deformabilidad a temperatura ambiente de aceros de alto silicio (≥ 4 wt% Si) mediante test de compresión,” *Rev. Metal.*, vol. 41, no. Extra, pp. 116–120, 2005.
- [95] J. E. Velasteguí Zurita, “Estudio de los procesos de soldadura SMAW y GMAW sobre acero ASTM a 36, a-500 y su incidencia en las propiedades mecánicas en las juntas soldadas de la estructura de buses,” B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica ..., 2014.
- [96] C. E. Flores, “Soldadura al arco eléctrico SMAW,” *Guatem. Univ. Rafael Landívar*, 2008.

- [97] K. A. Baldwin Metzger, "Experimental verification of a new single plate shear connection design model," PhD Thesis, Virginia Tech, 2006.
- [98] S. A. TOPE and E. POSICION, "SOLDADURA ELECTRICA".
- [99] B. F. México, "Clasificación de electrodos de la A.W.S." British Federal México, Ciudad de México, México, 2023. [Online]. Available: <https://www.bfmx.com/soldadura/clasificacion-electrodos-aws>
- [100] Pintuco, "Pintuco - Descargar." 2023. [Online]. Available: <https://pintuco.com.co/download/48989/?tmstv=1672344798>
- [101] Guao, "Psicología del color y la forma." 2023. [Online]. Available: <https://www.guao.org/sites/default/files/biblioteca/Psicolog%C3%ADa%20del%20color%20y%20la%20forma.pdf>
- [102] CGA, "Acero AISI SAE 1045." CGA, 2023. [Online]. Available: <https://www.cga.com.co/producto/acero-aisi-sae-1045/>
- [103] Casatornillos, "Grado 5." Casatornillos, 2023. [Online]. Available: <https://casatornillos.com/grado-5/>
- [104] Rambal, "Motorreductor Gearbox ATEX Motores trabajo pesado 45 rpm 60kg cm." 2024. [Online]. Available: <https://rambal.com/motor-reductor-gearbox/292-atex-motors-trabajo-pesado-45-rpm-60kg-cm.html>
- [105] X. Steel, "AISI 4140 SAE 4140 ASTM 4140 ASTM A193 Grado B7 Varilla roscada." 2024. [Online]. Available: https://es.made-in-china.com/co_xinchengsteel78/product_AISI-4140-SAE-4140-ASTM-4140-ASTM-A193-Grade-B7-Threaded-Rod_uoysngyruy.html
- [106] M. Banzi, D. Cuartielles, T. Igoe, G. Martino, D. Mellis, and others, "Arduino," *Off. Arduino Web Page Httparduino Cc*, 2014.
- [107] R. C. Dorf, R. H. Bishop, S. D. Canto, R. D. Canto, and S. Dormido, *Sistemas de control moderno*. Pearson Educación, 2005.
- [108] M. J. L. de la Fuente, "Teorías del control motor, principios de aprendizaje motor y concepto Bobath. A propósito de un caso en terapia ocupacional.," *Rev. Electrónica Ter. Ocupacional Galicia TOG*, no. 18, p. 13, 2013.
- [109] M. López Tornos, "Sensores Inerciales para la Estimación de Ángulos de Rotación en Biomecánica," 2024.
- [110] R. OLEA, "Tratamiento de la parálisis cerebral infantil," *Rev. Chil. Pediatría*, vol. 31, no. 9, pp. 447–449, 1960.
- [111] G. P. L. MONSERRAT and M. K. I. CISNEROS, "GRUPO 10-1 TF".
- [112] D. González and M. C. Marcos, "Responsive web design: diseño multidispositivo para mejorar la experiencia de usuario," *BiD Textos Univ. Bibl. Doc. 2013 31*, 2013.
- [113] L. J. Serpa Andrade, "Diseño de un sistema inteligente de predicción y simulación para la escritura en niños con espasticidad," Master's Thesis, 2017.
- [114] C. C. D. MARTÍNEZ, "MODELO PREDICTIVO PARA EL PRONÓSTICO DE TIEMPOS DE ESTANCIA DE PACIENTES EN UNIDADES DE CUIDADOS INTENSIVOS".