



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño de dispositivos para la medición del
apego en el tratamiento de afecciones en
ortodoncia infantil**

TESINA

Que para obtener el título de
Ingeniero en Sistemas Biomédicos

P R E S E N T A

Carlos Enrique Rios Avila

DIRECTORA DE TESINA

M.A. Edna Santa Rangel Rangel



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado DISEÑO DE DISPOSITIVOS PARA LA MEDICION DEL APEGO EN EL TRATAMIENTO DE AFECCIONES EN ORTODONCIA INFANTIL que presenté para obtener el título de INGENIERO EN SISTEMAS BIOMÉDICOS es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

CARLOS ENRIQUE RÍOS AVILA
Número de cuenta: 421124529

Jurado Asignado

Presidente

M.I. Serafin Castañeda Cedeño

Vocal

M.A. Edna Santa Rangel Rangel

Secretario

Dr. Carlos Alberto Palacios Morales

1er Suplente

Dra. Zaida Estefania Alarcón Bernal

2do Suplente

M.I. Efrain Albor Ramírez

Agradecimientos

Agradezco a los doctores Brian Gonzales Corona y Claudia Lizbeth Luna Barrientos por confiar en mí para diseñar e implementar las ideas plasmadas en este escrito, y por apoyarnos con su experiencia y tomar en cuenta nuestras contribuciones.

A la Ing. Edna Rangel Rangel, asesora y mentora de este proyecto, cuyos consejos y experiencia fueron fundamentales en el diseño e implementación del dispositivo en el área clínica. Sus enseñanzas me formaron como ingeniero profesional con sensibilidad hacia las necesidades de los pacientes. Agradezco profundamente su paciencia, colaboración y motivación para que este proyecto alcanzara su mejor versión.

A mis padres, quienes con su cariño y apoyo incondicional me dieron el impulso para llegar hasta aquí. Mi mamá, quien siempre creyó en mí y me guio para tomar este camino; su fe en mí nunca faltó y eso me dio la fuerza para seguir adelante en los momentos más difíciles. Mi papá, quien fue el principal motivo por el que llegué a esta universidad; sin su motivación y compromiso a lo largo de toda mi formación, yo no estaría aquí. Gracias por todas las horas que me escucharon y por ese empujón que me daban justo cuando más lo necesitaba. Los quiero mucho y no tengo palabras suficientes para expresar lo que significa para mí saber que siempre puedo contar con ustedes.

A mis amigos, quienes hicieron estos años más llevaderos y me brindaron su apoyo en los momentos más difíciles. Siempre podrán contar conmigo, sin importar la distancia o el tiempo.

A mis profesores, quienes me dieron las herramientas técnicas y los valores para ser un gran profesionista. Agradezco especialmente a quienes me brindaron su amistad y me recibieron con los brazos abiertos más allá del aula; siempre los reconoceré como mis mentores.

A la universidad, por brindarme una educación de calidad y abrir sus puertas a personas foráneas que buscan formarse como profesionales y contribuir al desarrollo de México.

Dedicatoria

Quiero dedicar este logro a las personas que contribuyeron a mi formación personal y profesional; sus palabras, actos y valores forjaron en mí las aptitudes y el carácter para llegar hasta aquí.

A mis padres, quienes fueron el principal punto de apoyo en toda mi vida. Sin ellos este logro no se sentiría igual. Hoy quiero dedicarles mi formación y este trabajo que me otorgará el título de licenciatura en ingeniería. Mamá y Papá, todo lo que han hecho por mí y mis hermanos nunca lo olvidaré: dar más del cien por ciento cada día y nunca temer a los retos que se les presentaban. Su guía, amor y cariño están plasmados en este trabajo.

A mis hermanos, a quienes con este escrito quiero darles motivación para terminar una carrera universitaria y demostrarles que solo ellos mismos se ponen límites. Sé que serán los mejores en cualquiera que sea su profesión, pues hoy son ellos quienes me inspiran a ser mejor y a apoyar a todas las personas a quienes, con mi profesión, puedo cambiar la vida de forma directa o indirecta.

A los profesores que dejaron huella en mí, mentores cuyo granito de arena está presente en este proyecto y que me enseñaron un mundo donde la tecnología y la medicina pueden lograr grandes cosas. Quiero dedicar este trabajo especialmente al Ing. Adolfo Montes, maestro y gran amigo quien siempre vio en mí esa chispa de ingenio y talento para llegar a ser un profesional. Su bondad y su deseo genuino de ayudar a los demás me inspiraron a ser una mejor persona y a brindar apoyo sin condiciones. Siempre será una fuente de inspiración.

A mi tutora y mentora, la Ing. Edna Rangel Rangel. Sin ella este trabajo no habría llegado a escribirse, y sé que, al igual que yo, está orgullosa de todo lo que la creatividad y la dedicación pueden lograr. Nuestro trabajo seguirá apoyando a muchos médicos para ofrecer una mejor atención y las mejores soluciones a más niños.

Tabla de contenido

<i>Jurado Asignado</i>	<i>1</i>
<i>Agradecimientos</i>	<i>3</i>
<i>Dedicatoria</i>	<i>4</i>
<i>Tabla de contenido.....</i>	<i>5</i>
<i>Introducción.....</i>	<i>7</i>
<i>Capítulo 1 . Antecedentes.....</i>	<i>8</i>
<i>Capítulo 2 Definición del problema</i>	<i>11</i>
2.1 Conceptualización del producto.....	11
2.2. Selección de recursos y procesos.	13
2.3 Primeros prototipos del dispositivo.	13
2.4 Validación de dispositivo.....	17
<i>Capítulo 3 Metodología utilizada.....</i>	<i>19</i>
3.1 Selección de métodos y metodología aplicada.	19
3.2 Justificación del uso de la metodología.	20
<i>Capítulo 4 Resultados.....</i>	<i>22</i>
4.1 Resultado obtenidos del sistema de monitoreo.....	23
4.2 Análisis del comportamiento del dispositivo	27
4.3 Cuantificación del tiempo de uso	31
4.4 Desempeño del dispositivo.....	38
<i>Capítulo 5 Conclusiones.....</i>	<i>41</i>

5.1 Logros alcanzados respecto a los objetivos planteados.....	41
5.2 Implicaciones de los logros para el campo de la ingeniería	41
5.3 Lecciones aprendidas durante el desarrollo del proyecto.....	42
5.4 Recomendaciones para futuros trabajos	42
5.5 Impacto del proyecto en la práctica profesional personal	43
<i>Índice de imágenes.....</i>	<i>44</i>
<i>Anexo 1 Código de operación del dispositivo</i>	<i>46</i>
<i>Bibliografía y Referencias.....</i>	<i>53</i>

Introducción

El propósito principal de este informe es plasmar de forma escrita todas las ideas que se tuvieron desde la ideación hasta la conceptualización, durante el desarrollo de este proyecto; para así demostrar que en el campo de la ingeniería es posible llevar un proyecto desde una idea abstracta hasta un documento profesional terminado.

Este documento refleja todas las actividades profesionales que se llevaron a cabo para el desarrollo y culminación de este proyecto, y considera principalmente tres etapas: ideación y conceptualización; desarrollo y producción; pruebas y validación; las cuales fueron esenciales para el éxito de este proyecto.

El objetivo principal es que el personal médico contara con un dispositivo que le permitiera contabilizar el tiempo de uso de la terapia de ortodoncia, y que a su vez generara una base de datos consistente, la cual contribuye a una toma de decisiones clínicas con respecto al paciente y tratamiento.

Estos datos serán transmitidos y estudiados posteriormente con ayuda de un software de hoja de cálculo que con modificaciones se puede enlazar al dispositivo por red WIFI y descargar los datos, además de generar una visualización gráfica de los resultados y lograr ser más amigable con el usuario.

Durante la formación de la carrera como Ingeniero en Sistemas Biomédicos se nos inculca poder resolver problemáticas con soluciones técnicas que cumplan con los requerimientos técnicos y calidad. En este proyecto, el hecho de diseñar un dispositivo que estará en contacto directo con un paciente y estará funcionando 24/7 durante todo un mes involucra generar un diseño ergonómico; la electrónica no debe presentar fallas que puedan lastimar al paciente, además de cumplir estándares de calidad.

El reto conlleva aplicar contextos teóricos prácticos y combinarlos con aspectos de seguridad, comodidad y mejora en la experiencia del usuario. Lograr que un dispositivo de medición adicional al que usa en terapia sea un beneficio en la toma de decisiones y no un factor que haga que el paciente se niegue a utilizar su mascarilla por molestia, sentimientos de incomodidad o por factores sociales. Este proyecto necesitó tener en claro un proceso de diseño estructurado, aplicar conocimientos tanto ingenieriles como de experiencia y trato de los pacientes para tener un crecimiento en la aceptación de un nuevo producto.

Capítulo 1 . Antecedentes

La Fisura Labio Alveolo Palatina (FLAP) es la anomalía craneofacial congénita más común; se origina durante las primeras 6 semanas de gestación y representa el 65% de las anomalías de cabeza y cuello. La maloclusión Clase III es un problema de mordida en el que los dientes inferiores quedan por delante de los dientes superiores. Este patrón, característico de la maloclusión Clase III asociada con mordida cruzada anterior en pacientes con FLAP, representa uno de los mayores retos en ortodoncia debido a las alteraciones tempranas del crecimiento craneofacial (Eddin Alzoubi, Camilleri, Al Muzian, & Attard, 2023)

Los tratamientos quirúrgicos, además de ofrecer beneficios funcionales y estéticos, pueden influir negativamente en el crecimiento maxilar. Se ha señalado que ciertas afecciones maxilares, ausentes antes de la intervención, se desarrollan posteriormente como consecuencia de la formación de tejido cicatricial derivado de la cirugía (Manosudprasit, Wangsrimongkol, Pisek, Chowchuen, & Somsuk, 2012). Ante esto, la terapia con máscara facial de protracción constituye una alternativa terapéutica eficaz para optimizar los resultados clínicos, ya que busca favorecer el crecimiento y posicionamiento del maxilar y disminuir la probabilidad de requerir cirugía. Sin embargo, la efectividad de esta terapia depende en gran medida del apego al tratamiento: cuanto más se utilice la máscara y se cumpla el tiempo prescrito por el médico, más favorables serán los resultados. Esta dependencia del apego es, precisamente, lo que convierte al monitoreo cuantificable del tiempo de uso en una herramienta clínica relevante, tanto para el seguimiento como para la toma de decisiones sobre el avance del tratamiento (Wafaie, Rizk, Basyouni, Daniel, & Mohammed, 2023).

El monitoreo del apego terapéutico en ortodoncia infantil representa un desafío persistente en la práctica clínica. Durante mucho tiempo, el apego al tratamiento con aparatos removibles se evaluaba únicamente mediante el autorreporte de pacientes y padres, un método que se ha demostrado poco confiable por su subjetividad (Stocker, Willmann, Wilmes, Vasudavan, & Drescher, 2016). Esto limitaba la capacidad de los profesionales para fundamentar sus decisiones y analizar los resultados del tratamiento con base en datos objetivos.

Un avance significativo se logra con la introducción del Smart Retainer, presentado en el artículo del autor Ackerman, McRae y Longley (2009). Este dispositivo integraba un microsensor ambiental en retenedores removibles, capaz de registrar las condiciones de uso y generar reportes gráficos. Se trató del primer dispositivo documentado en literatura científica que permitió una cuantificación objetiva del tiempo de uso, marcando un hito en la evolución de la ortodoncia basada en evidencia.

Posteriormente, se desarrolló el TheraMon® microsensor, ampliamente utilizado en diversos aparatos ortodóncicos. Se ha demostrado su utilidad en tratamiento temprano de una maloclusión Clase III con máscara facial en un paciente infantil. Asimismo, este microsensor se ha utilizado en aparatos como retenedores bucales, donde se adapta el dispositivo de manera interna. De acuerdo con diferentes artículos, el sensor TheraMon ha registrado un promedio de 10.8 horas de uso diario, en contraste con las 16 horas prescritas clínicamente; el uso de estos sensores ha demostrado una discrepancia significativa entre la indicación médica y la adherencia real. Los resultados cuantitativos de los diferentes estudios realizados previamente a mi prototipo indican que los datos medidos por un dispositivo pueden modificar la percepción del éxito terapéutico y ajustar las expectativas clínicas. (Stocker, Willmann, Wilmes, Vasudavan, & Drescher, 2016)

En años más recientes, los microsensors se han consolidado como herramientas confiables para evaluar el apego a los tratamientos removibles en contextos clínicos amplios. Se han llevado a cabo estudios de tipo prospectivo, en los cuales se ha concluido que el tiempo de uso real de los aparatos removibles fue casi la mitad de lo recomendado. Además, reportaron diferencias en el cumplimiento según el tipo de aparato y el sexo de los pacientes, reforzando la idea de que el apego debe analizarse con mayor detalle para personalizar los protocolos de tratamiento. (Nahajowski, 2022)

La precisión del TheraMon® también ha sido objeto de estudio. Se evaluó el desempeño del sensor en voluntarios, encontrando que este tiende a registrar menos tiempo de uso del real, con una subestimación promedio del ~4% que puede llegar hasta 5.5 horas en casos extremos, con variaciones según la ubicación intraoral. En particular, los sensores colocados en el surco bucal inferior ofrecieron resultados más exactos que aquellos situados en el paladar. Estos hallazgos resaltan la necesidad de considerar aspectos técnicos de ubicación y calibración en el diseño de dispositivos de monitoreo. (Brierley, Benson, & Sandler, 2017).

Por otro lado, el estudio realizado por Wafaie et al. (2023) exploró la precisión de los microsensors térmicos en diferentes tipos de retenedores y grosores de material mediante un estudio in vitro. Los

resultados indican que el grosor y la composición del aparato influyen en la exactitud del registro térmico, siendo los retenedores más delgados los que ofrecieron lecturas más confiables. (Wafaie K. S.-B.-B., 2023) Esta investigación permite destacar la importancia del punto de vista de la ingeniería biomédica, pues señala que los factores de diseño y materiales son determinantes, considerando también la comodidad y usabilidad del paciente para que el dispositivo no afecte su funcionalidad.

En conjunto, estos estudios reflejan una evolución progresiva en el abordaje del problema: desde la dependencia en métodos subjetivos hasta la adopción de microsensores que proporcionan datos objetivos, cuantificables y aplicables tanto en la práctica clínica como en la investigación. Además, hallazgos recientes muestran que, aunque la tecnología ha mejorado la medición del apego, persisten desafíos relacionados con el diseño, precisión y la integración de los dispositivos en el entorno clínico. Por otra parte, cabe destacar la poca accesibilidad de esta tecnología en hospitales públicos mexicanos. (Nahajowski, 2022) por sus precios elevados para el nivel socioeconómico del paciente. Estos antecedentes constituyen la base para el desarrollo de soluciones con mayor accesibilidad, donde la participación de la ingeniería en sistemas biomédicos busca mejorar la confiabilidad, ergonomía y aplicabilidad de los sistemas de monitoreo en ortodoncia infantil.

Capítulo 2 Definición del problema

2.1 Conceptualización del producto.

El proyecto surge con la idea de desarrollar un dispositivo que cuantificara el apego del tratamiento de ortodoncia en pacientes infantiles y con este evaluar el avance de los resultados con base en el tiempo de uso, ya que la literatura menciona que el periodo adecuado son 14 horas al día para tener resultados favorables en el uso de ese tipo de mascarillas. Como ya se ha mencionado anteriormente, existen algunos dispositivos que permiten hacer esta cuantificación, sin embargo, son costosos y de difícil acceso para nuestra población objetivo.

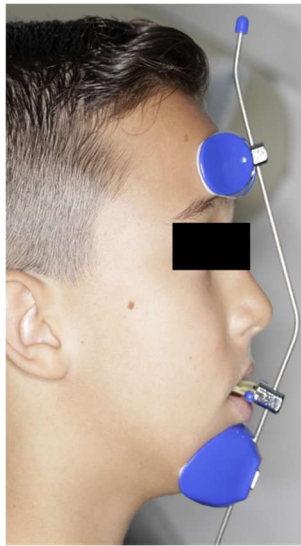


Imagen 1 Mascarilla implementada en el tratamiento de ortodoncia.

Fuente: <https://velezylozano.com/la-mascara-facial-por-que-se-usa-en-ortodoncia/>

El Hospital General "Dr. Manuel Gea González", es uno de los institutos de tercer nivel de atención hospitalaria que en su mayoría ofrece sus servicios a personas sin seguridad social, es decir, sin acceso a servicios como el IMSS o el ISSSTE, tales como: trabajadores informales, comerciantes o personas con bajos recursos, para quienes el acceso a esta tecnología no se ajusta a su presupuesto o prefieren no invertir en este aparato. Es por esto que el personal médico del área de estomatología contacta a ingenieros biomédicos del área de innovación médica del hospital para buscar una solución, generar algo tangible y que pueda cumplir con los objetivos de medir el apego al tratamiento.

A partir de una reunión de trabajo se establecieron las principales tareas que tiene que lograr el dispositivo, entre ellas están obtener una medición cuantitativa que pueda traducir el apego al tratamiento en función del tiempo de uso, desarrollar un dispositivo de bajo costo y facilitar la gestión de los datos para su análisis posterior. Es por esto que se dividió en cuatro puntos importantes del dispositivo (Imagen 2):

- Sistema de alimentación eléctrica.
- Indicador de carga de baterías.
- Sistema de procesamiento de datos y control del sensor.
- Sensor de variable físicas.

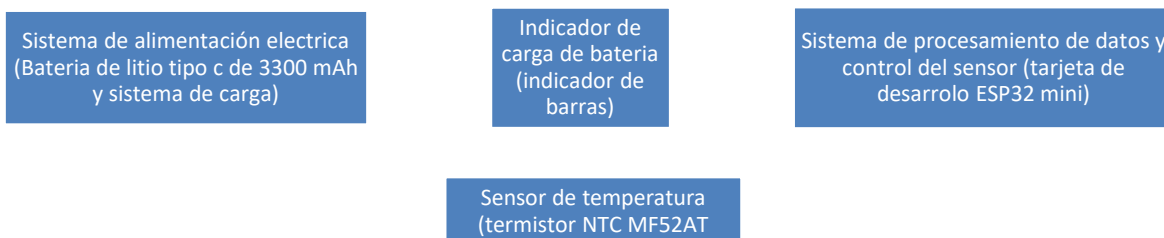


Imagen 2 Idealización y conceptualización del dispositivo

2.2. Selección de recursos y procesos.

Al discutir y confirmar los lineamientos, se seleccionó una variable física que permita cuantificar el tiempo real de uso de los aparatos ortodóncicos. Al evaluar diferentes opciones (presión y temperatura), se determinó que la alternativa más confiable era un sensor de temperatura (termistor NTC MF52AT) debido a que esta variable nos ofrece la oportunidad de conocer cuando lo está usando. Utilizando un rango de temperatura corporal de 34 °C a 38 °C que permitiera establecer un criterio objetivo para detectar el contacto del dispositivo con la piel.

Un sistema de información que le permita a los usuarios conocer el estado de la batería, esto para evitar que el registro de la información se pierda al apagarse el dispositivo y esto provoque datos falsos que no ayuden a conocer el apego que tiene el paciente con su dispositivo asignado. Para ello necesitábamos estandarizar señales que indicaran el momento en que el dispositivo necesitara cargarse, esto debe ser comprensible tanto para los pacientes infantiles como para sus tutores, considerando que el cuidado correcto de este proyecto involucra la participación y apoyo de las personas a las que está dirigido.

Parte fundamental es el procesamiento de datos y control del sensor, se utilizó una tarjeta de desarrollo ESP32, que ofrece conectividad WiFi, almacenamiento mediante SPIFFS y transmisión en tiempo real hacia una base de datos en Google Sheets, registrando fecha, hora y temperatura. Esto permitió disponer de información continua y representarla en gráficos para una interpretación clínica más sencilla.

Para el sistema de alimentación eléctrica, se optó por una batería recargable de litio de 3300 mAh, acompañada de un indicador LED de carga. Finalmente, para proteger todos los componentes electrónicos se diseñó una carcasa mediante manufactura aditiva (impresión 3D) buscando la portabilidad y ergonomía del prototipo, priorizando la facilidad de uso e interacción con el paciente.

El sensor de temperatura se coloca en la mascarilla que está en contacto con la frente del paciente y la carcasa con todos los componentes electrónicos en el brazo del paciente.

2.3 Primeros prototipos del dispositivo.

Uno de los principales retos fue generar un dispositivo con un tiempo de carga en las baterías de más de 14 horas consecutivas, esto llevó a considerar como primera opción una batería de alto amperaje, esperando

que pudiera resistir el consumo requerido por todo el procesamiento de datos. El tamaño de este componente complicaba el diseño provocando que el primer prototipo fuera muy voluminoso, con dimensiones de 5cm x 4cm x 7cm (imagen 3). Sin embargo, al tener nuestro primer prototipo se decidió implementarlo con un paciente después de haber realizado pruebas en el taller al tener una respuesta satisfactoria, el principal objetivo de llevarlo a campo era conocer las necesidades que surgen después de haber usado el producto por más de 30 días.

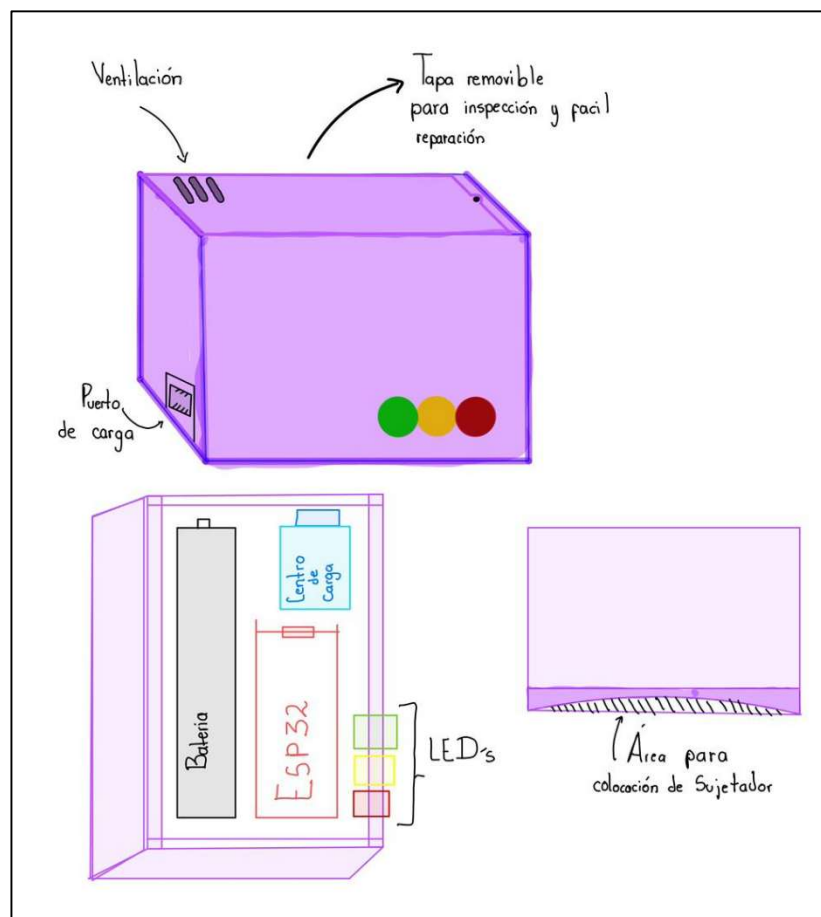


Imagen 3 Idealización y conceptualización del dispositivo

La primera ronda de experimentación del comportamiento del dispositivo duró 15 días, en este se obtuvo un registro; sin embargo, los componentes mostraban ciertas imperfecciones y áreas de mejora que podían ser resueltas antes de armar un nuevo dispositivo (Imágenes 4 y 6). También notamos que los tiempos de

espera de descarga de datos por conexión WiFi eran muy extensos, provocando molestia en los pacientes. Fuera de estos acontecimientos detectados, el flujo de operación del dispositivo funcionó como se tenía planeado.

Los resultados favorables del uso del dispositivo en los pacientes infantiles abrieron la posibilidad de fabricar más unidades para igualar el número de máscaras disponibles en el hospital, que actualmente suman 15 máscaras faciales (Imagen 5).

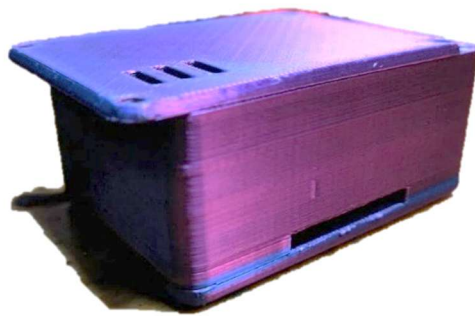


Imagen 4 Primer prototipo en impresión 3D

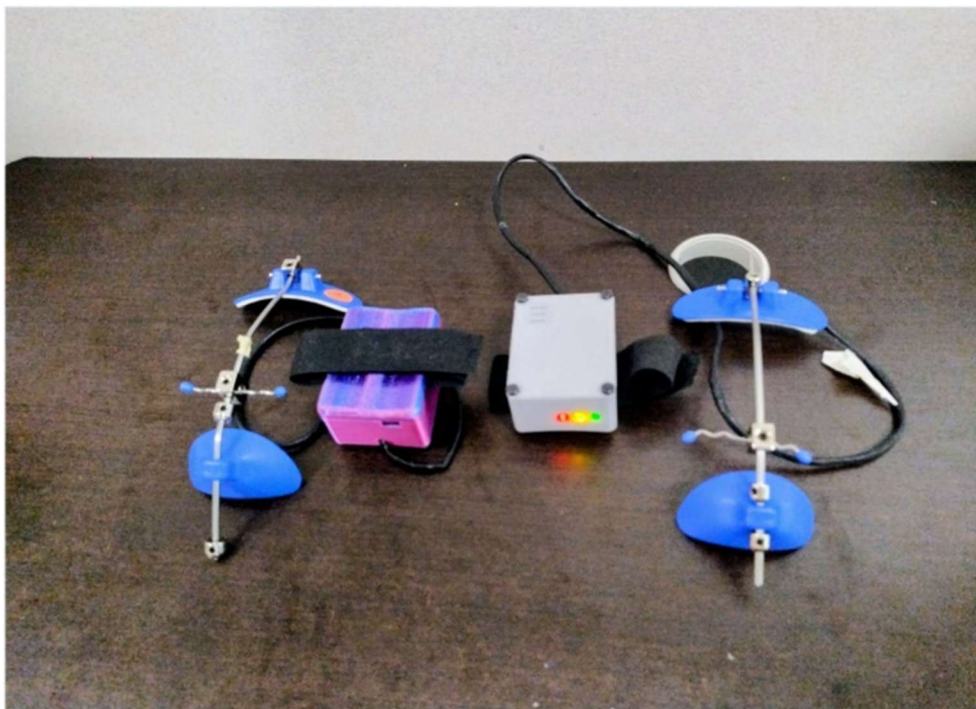


Imagen 5 Primeros prototipos del dispositivo

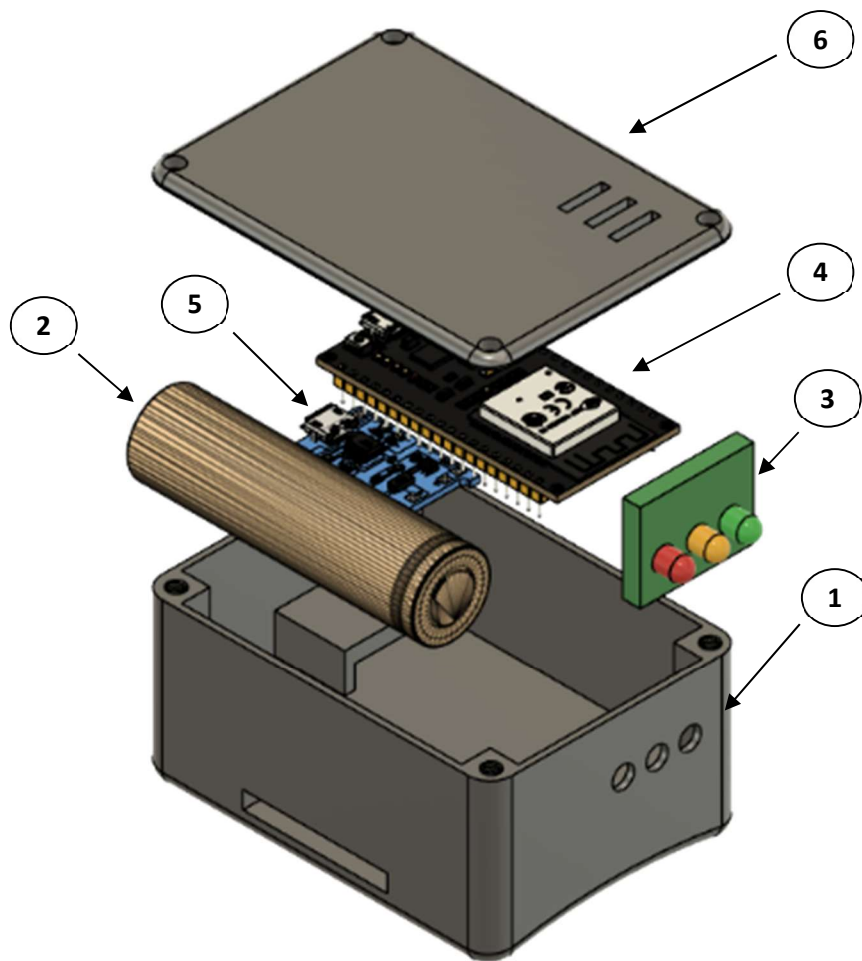


Imagen 6 Vista explosionada de la primera versión del proyecto, además de los componentes que se usaron por primera vez. (1) Caja (2) Batería Litio 3300 mAh (3) Indicador de LEDs (4) ESP32 (5) Cargador de baterías de litio (6) Tapa.

2.4 Validación de dispositivo.

Tras las primeras pruebas con el primer prototipo surgió un reto importante: mejorar la comodidad de los pacientes infantiles y evitar el rechazo al tratamiento. Como se observa en la Imagen 7, la colocación del dispositivo puede generar molestias, y según comentarios de los padres, la conexión entre la mascarilla y el dispositivo representa un riesgo por jalones involuntarios y desconexiones.

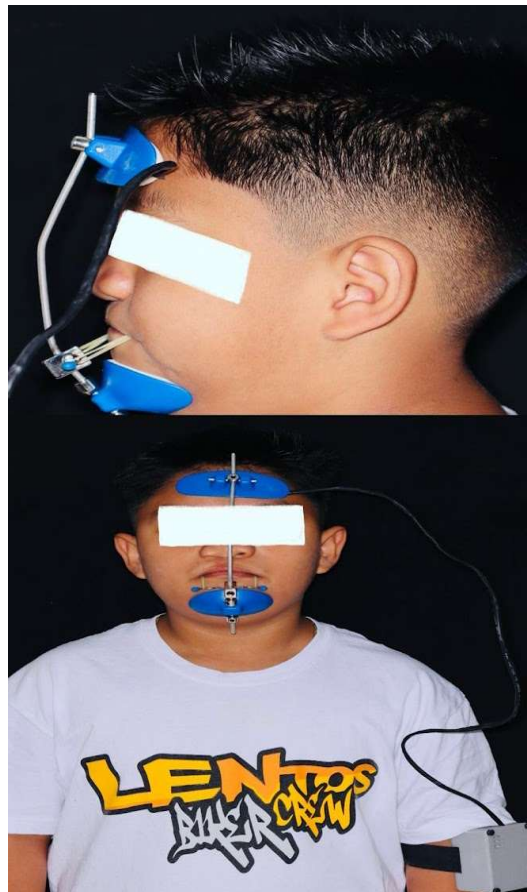


Imagen 7 Primera ronda de pruebas con participantes del caso clínico del área de estomatología.

La principal solución fue reducir el tamaño del dispositivo para hacerlo más compacto, además de reubicar su colocación en una zona que ofrezca mayor movilidad sin restringir el movimiento del paciente. Al modificar el tamaño fue necesaria una nueva selección de componentes: una nueva tarjeta de

procesamiento que ofreciera las mismas funciones, pero en un tamaño compacto, y un sistema de alimentación con una batería que lograra alimentar la nueva tarjeta de procesamiento de datos sin verse limitada, permitiendo así este proceso de miniaturización.

Para lograrlo, cambiamos de una ESP32 a una ESP32 C3 Supermini, una tarjeta que lograba las mismas características y con la capacidad de almacenar datos de mínimo un mes, que también permite la miniaturización. Investigando la gama de baterías disponibles en el mercado, optamos por usar una batería LiPo de 700 mAh que, además de ser recargable, su tamaño compacto favorece nuestro nuevo objetivo.

Otra área de mejora fue el tiempo de descarga, para ello se implementó una aplicación desarrollada en el entorno de Python para el proceso de búsqueda de la información dentro de la memoria flash de la tarjeta de desarrollo; al mismo tiempo, esta aplicación descarga los datos y los almacena en un documento tipo .CSV para su procesamiento y análisis en Google Sheets. Otra de las funciones de esta aplicación es verificar el contenido en la memoria de los dispositivos y borrar los datos de estos mismos.

El diseño de este dispositivo puso a prueba diferentes áreas de la ingeniería, como el diseño electrónico y la programación del funcionamiento del dispositivo; es decir, todo el flujo operativo desde cómo funciona el sensor, guardar los datos que registra, su procesamiento para almacenarlo en la base de datos y analizarlo. También el diseño de la carcasa que haría el empaquetamiento de los componentes para su portabilidad y protección. Como ingeniero en sistemas biomédicos, fusionar este dispositivo para apoyar la interpretación clínica del tratamiento, transformando la validación del apego en valores cuantitativos analizables mediante gráficas que mejoren la toma de decisiones. Sobre todo, se buscó un diseño centrado en el usuario, que en este caso fueron pacientes infantiles, para no restringir sus actividades diarias y convertirlo en una herramienta de utilidad.

Capítulo 3 Metodología utilizada

3.1 Selección de métodos y metodología aplicada.

La metodología utilizada en este proyecto se enmarca en una investigación aplicada, ya que el propósito principal es desarrollar una solución tecnológica que responda directamente a la necesidad clínica identificada en el área de estomatología del Hospital General Dr. Manuel Gea González, ubicado en la Ciudad de México, institución de tercer nivel de atención. El objetivo no es generar teorías nuevas, sino implementar un dispositivo funcional capaz de cuantificar el "tiempo real de uso" de la máscara facial utilizada en tratamientos ortodóncicos pediátricos.

Desde el punto de vista epistemológico, el estudio se clasifica como cuantitativo, debido a que la variable utilizada para la obtención del tiempo de uso es la temperatura y se registra de forma numérica, objetiva y continua. El análisis del comportamiento térmico permite determinar de manera reproducible cuándo el dispositivo está en contacto con la piel del paciente y cuándo no, eliminando la subjetividad del interrogatorio tradicional.

Asimismo, la investigación adoptó un enfoque experimental, ya que el prototipo fue implementado, sometido a pruebas y evaluado directamente en un paciente pediátrico durante un periodo de 15 días. Esto permitió validar el funcionamiento del sensor, el sistema propuesto y el proceso de registro de datos bajo condiciones reales de uso.

Paralelamente, desde una perspectiva de ingeniería, se empleó el Proceso de Diseño de Ingeniería, una metodología estructurada que sigue el siguiente esquema:

1. Identificación y definición del problema clínico.
2. Especificaciones de requerimientos funcionales y técnicos.
3. Análisis y selección de variables físicas y cuantitativas.
4. Diseño conceptual del sistema;
5. Desarrollar el prototipo electrónico y estructural.

6. Desarrollo de la lógica de funcionamiento del sistema de adquisición de datos.
7. Pruebas de funcionamiento y validación del dispositivo.

3.2 Justificación del uso de la metodología.

La selección de estos métodos fue resultado de las características que tenía el problema a resolver. La medición directa del tiempo de uso no era factible debido a que se necesitaba un valor que permitiera clasificar si el paciente utiliza el tratamiento y cuándo no, por lo que se evaluaron diferentes variables físicas. Entre ellas, la propiedad que mejor se adapta a la necesidad es la temperatura corporal, por su confiabilidad, estabilidad y facilidad de integración en la máscara facial, por lo que se seleccionó un sensor que permite cuantificar esta variable.

De igual manera, se tuvo que elegir una tarjeta de procesamiento de datos, por lo que se optó por una tarjeta ESP32-C3 Super Mini debido a su tamaño compacto, capacidad de procesamiento, conectividad y bajo costo, además de la experiencia previa con este tipo de placas durante el prototipado inicial. Con ello se contaba ya con un componente capaz de lograr las características necesarias para un dispositivo portátil.

El desarrollo inicia con la conceptualización del sistema, seguida de la selección del sensor NTC MF52AT, el diseño y modelado de los componentes para aprovechar al máximo el espacio disponible y compactar todo, el armado del circuito priorizando soldaduras duraderas y con buena sujeción a los componentes (Imagen 8 muestra la integración de todos los componentes seleccionados), la calibración del rango térmico (34–38°C), la programación del microcontrolador y la configuración del sistema de registro de datos en Google Sheets. Posteriormente se implementó una aplicación en Python como alternativa para descargar los datos y reducir el tiempo de espera de los pacientes y sus familiares, mediante transmisión de información por conexión serial.

La fase de pruebas se realizó con un primer prototipo para comprobar que la conceptualización del funcionamiento planteada inicialmente funcionara tal cual lo planeado. Al transcurrir quince días naturales con el dispositivo, se logró verificar la validez del método de medición y evaluar la ergonomía y tolerancia del dispositivo, permitiendo iniciar un proceso de miniaturización orientado a mejorar el apego al tratamiento y su evaluación.

Las herramientas empleadas incluyeron componentes electrónicos como placas de desarrollo de la familia ESP32, baterías de polímeros de litio (LiPo), módulo de carga TP4056, carcasa fabricada por manufactura aditiva (extrusión de material FDM) y programa de modelado mecánico (Fusion 360), software de programación (Arduino IDE y Python), así como plataformas de gestión y visualización de datos (Google Sheets). Estos recursos permitieron integrar un sistema portátil, ligero y funcional capaz de generar información objetiva para la evaluación del apego al tratamiento ortodóncico.

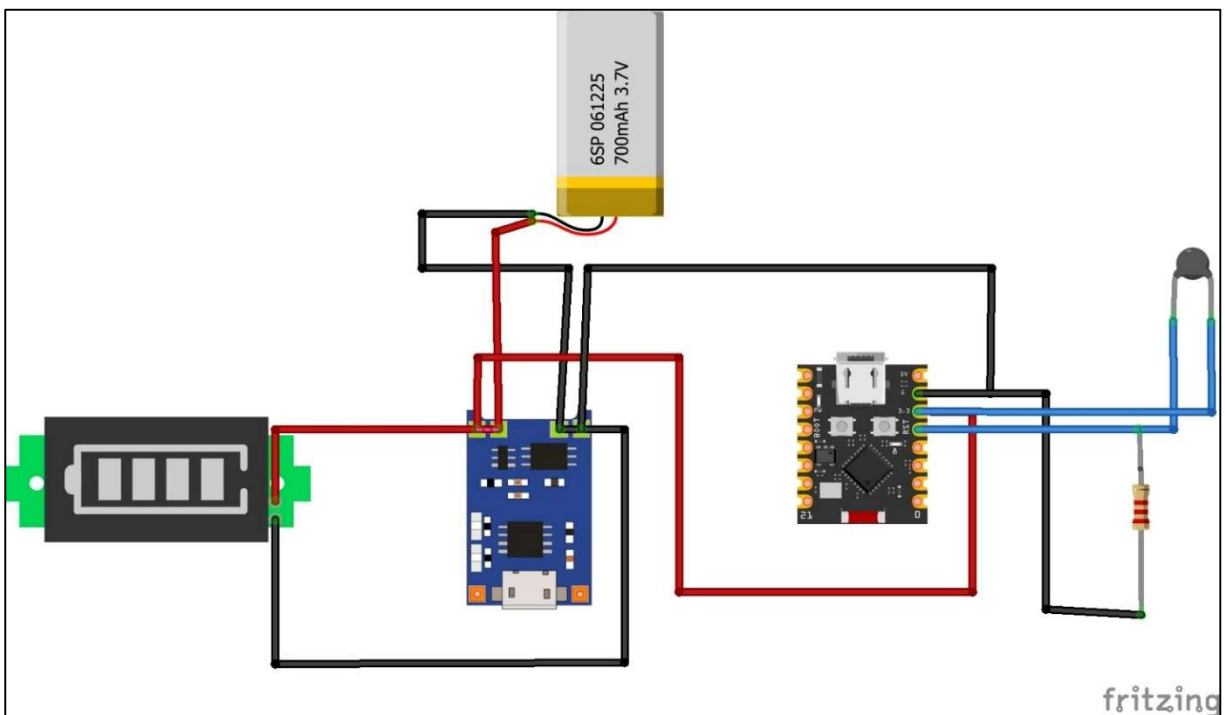


Imagen 8 Diagrama de componentes electrónicos.

En general, esta metodología no solo permitió el desarrollo de un prototipo funcional, sino también la validación inicial de su desempeño y la identificación de mejoras para futuras versiones, consolidando el proyecto como una aportación de valor en el ámbito de la ingeniería clínica y la innovación médica.

Capítulo 4 Resultados

El proyecto se llevó a cabo en dos etapas, de las cuales estuvimos cumpliendo objetivos específicos. Sin embargo, los resultados esperados en general fueron los siguientes:

- Generar un dispositivo portátil que logre cuantificar el tiempo de uso y eliminar el método tradicional de un interrogatorio cualitativo.
- Lograr la comodidad del paciente pediátrico al diseñar un aparato ligero, ergonómico y que no restrinja su movimiento.
- Realizar un proceso de miniaturización para lograr la portabilidad del dispositivo.
- Desarrollar un visualizador que permita analizar la información por medio de graficas interactivas.

El análisis de resultados se realizó mediante un enfoque descriptivo cuantitativo, a partir de los datos registrados a través del sistema de monitoreo basado en la temperatura. Las mediciones obtenidas fueron procesadas para identificar los periodos donde la terapia era utilizada, siendo el criterio de uso un rango de temperatura entre 34°C y 38°C (este se decidió tomando en consideración el rango en el cual la Organización Mundial de la Salud indica que una persona se encuentra en equilibrio térmico). Los resultados fueron representados mediante gráficas de temperatura en función del tiempo, lo que permitió evaluar el comportamiento del dispositivo, identificar los periodos de uso y no uso, así como evaluar la continuidad del registro.

En torno a esto se desarrolló todo el proyecto, siempre cuidando generar un dispositivo funcional sin afectar la estética y seguridad de los participantes.

4.1 Resultado obtenidos del sistema de monitoreo

El sistema desarrollado permitió registrar de manera continua la temperatura del dispositivo colocado en la mascarilla de ortodoncia, generando una base de datos con información correspondiente al uso de los pacientes. En las imágenes 10, 11 y 12 se muestra de forma visual la captura de información por parte del dispositivo.

La primera ronda de pruebas tuvo una duración de 15 días, tiempo que permitió conocer si el dispositivo cumple y funciona de acuerdo con lo esperado. Una vez aprobado, se realizaron pruebas a 30 días y para ello también se modificó la lógica para que el dispositivo registrara información cada 20 minutos, logrando que la memoria retuviera la información durante todo ese periodo. El dispositivo almacenó correctamente los datos de temperatura junto con su respectiva marca de tiempo (fecha y hora), lo que permitió analizar el tratamiento de forma objetiva. La transmisión y visualización de estos datos mediante una hoja de cálculo permitió su interpretación por parte del usuario.

Los datos se almacenan en una base de datos, cuya transmisión se realizaba inicialmente a través de una conexión WiFi; sin embargo, posteriormente se implementó una interfaz que permite descargar los datos directamente de la tarjeta de procesamiento mediante conexión USB, generando un archivo .CSV (tipo de archivo que almacena los datos en formato de tabla compatible con Google Drive). Posteriormente se realizó su análisis e interpretación como se muestra en la imagen 9.

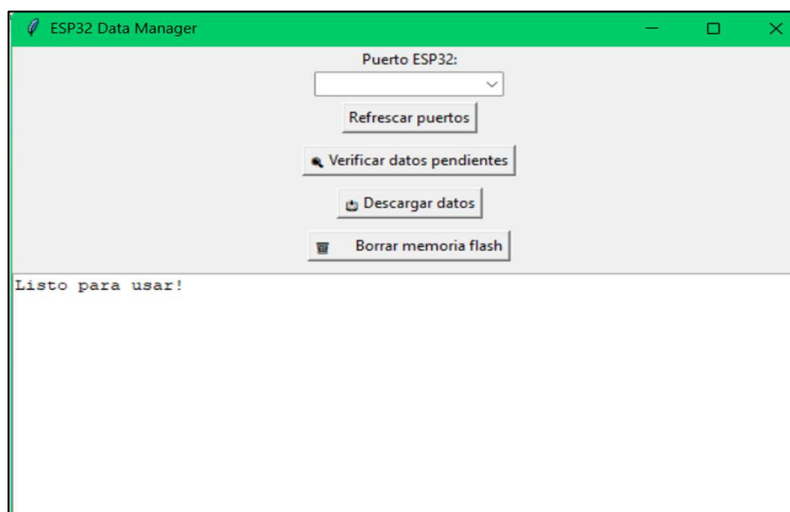


Imagen 9 Interfaz de la aplicación de descarga de datos.

BD_Dispositivo1_Estomatologia										
Archivo Editar Ver Insertar Formato Datos Herramientas Extensiones Ayuda Uso/Día Uso/Rango Tiempo de Uso Temperatura /día Temperatura /rango										
Menús 90% \$ % .0 .00 123 Predet... - 10 + B I A										
N11	fx									
	A	B	C	G		H	I	J	K	L
1	Fecha	Hora	Temperatura	Nombre del paciente:						
2				Fecha de inicio de Tratamiento:		8/8/2025				
3	2025-08-01	10:45:54 a.m.	25.78							
4	2025-08-01	11:05:54 a.m.	25.68							
5	2025-08-01	11:25:54 a.m.	25.54							
6	2025-08-01	11:45:54 a.m.	25.35							
7	2025-08-01	12:05:54 p.m.	25.28							
8	2025-08-01	12:25:54 p.m.	25.22							
9	2025-08-01	12:45:54 p.m.	25.01							
10	2025-08-01	1:05:54 p.m.	24.85							
11	2025-08-01	1:25:54 p.m.	24.68							
12	2025-08-01	1:45:54 p.m.	24.41							
13	2025-08-01	2:05:54 p.m.	24.11							
14	2025-08-01	2:25:54 p.m.	23.81							
15	2025-08-01	2:45:54 p.m.	23.16							
16	2025-08-01	3:05:54 p.m.	23.47							
17	2025-08-01	3:25:54 p.m.	23.96							
18	2025-08-01	3:45:54 p.m.	24.93							
19	2025-08-01	4:05:54 p.m.	24.94							
20	2025-08-01	4:25:54 p.m.	25.43							
21	2025-08-01	4:45:54 p.m.	25.00							
22	2025-08-01	5:05:54 p.m.	24.76							
23	2025-08-01	5:25:54 p.m.	24.47							
24	2025-08-01	5:45:54 p.m.	24.06							
25	2025-08-01	6:05:54 p.m.	23.95							
26	2025-08-01	6:25:54 p.m.	23.90							
27	2025-08-01	6:45:54 p.m.	23.83							

Imagen 10 Se muestra la interfaz que se programó en Apps Scripts del Dispositivo 1 Miniaturizado. Por fines de seguridad no se muestra el nombre del participante.

BD_Dispositivo2_Estomatologia									
Archivo Editar Ver Insertar Formato Datos Herramientas Extensiones Ayuda Uso/Dia Uso/Rango Tiempo de Uso Temperatura /dia Temperatura /rango									
Menús 100% \$ % .0 .00 123 Predet... 10 B I A									
J5	fx								
	A	B	C	E	F	G	H	I	
1				Nombre del paciente:					
2	Fecha	Hora	Temperatura	Fecha de inicio de Tratamiento:		6/6/2025			
3	2025-06-06	12:33:21 p.m.	32.13						
4	2025-06-06	12:53:21 p.m.	33.69						
5	2025-06-06	1:13:21 p.m.	35.25						
6	2025-06-06	1:33:21 p.m.	28.05						
7	2025-06-06	1:53:21 p.m.	27.26						
8	2025-06-06	2:13:21 p.m.	27.15						
9	2025-06-06	2:33:21 p.m.	27.08						
10	2025-06-06	2:53:21 p.m.	26.87						
11	2025-06-06	3:13:21 p.m.	26.85						
12	2025-06-06	3:33:21 p.m.	27.33						
13	2025-06-06	3:53:21 p.m.	25.92						
14	2025-06-06	4:13:21 p.m.	26.73						
15	2025-06-06	4:33:21 p.m.	26.41						
16	2025-06-06	4:53:21 p.m.	27.18						
17	2025-06-06	5:13:21 p.m.	27.77						
18	2025-06-06	5:33:21 p.m.	27.94						
19	2025-06-06	5:53:21 p.m.	28.00						
20	2025-06-06	6:13:21 p.m.	23.71						
21	2025-06-06	6:33:21 p.m.	23.34						
22	2025-06-06	6:53:21 p.m.	26.69						
23	2025-06-06	7:13:21 p.m.	31.44						
24	2025-06-06	7:33:21 p.m.	32.41						
+ Hoja 1 Uso/Dia Uso/Rango Tiempo de Uso Temperatura/dia Temperatura/Rango									

Imagen 11 Se muestra la interfaz que se programó en Apps Scripts del Dispositivo 2 Miniaturizado. Por fines de seguridad no se muestra el nombre del participante.

BD_Dispositivo4_Estomatologia								
Archivo Editar Ver Insertar Formato Datos Herramientas Extensiones Ayuda Uso/Dia Uso/Rango Tiempo de Uso Temperatura /dia Temperatura /rango								
Menús 100% \$ % .0 .00 123 Predet... - 10 + B I A								
120	fx							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1					Nombre del paciente:			
2	Fecha	Hora	Temperatura		Fecha de inicio de Tratamiento:	6/6/2025		
3	2025-06-06	12:39:01 p.m.	29.07					
4	2025-06-06	12:59:01 p.m.	29.43					
5	2025-06-06	1:19:01 p.m.	29.23					
6	2025-06-06	1:39:01 p.m.	28.98					
7	2025-06-06	1:59:01 p.m.	28.78					
8	2025-06-06	2:19:01 p.m.	31.82					
10	2025-06-06	3:19:01 p.m.	31.42					
11	2025-06-06	3:39:01 p.m.	32.27					
12	2025-06-06	3:59:01 p.m.	32.07					
13	2025-06-06	4:19:01 p.m.	32.05					
14	2025-06-06	4:39:01 p.m.	30.91					
15	2025-06-06	4:59:01 p.m.	30.33					
16	2025-06-06	5:19:01 p.m.	34.11					
17	2025-06-06	5:39:01 p.m.	34.62					
18	2025-06-06	5:59:01 p.m.	34.30					
19	2025-06-06	6:19:01 p.m.	34.09					
20	2025-06-06	6:39:01 p.m.	34.86					
21	2025-06-06	6:59:01 p.m.	32.93					
22	2025-06-06	7:19:01 p.m.	30.83					
23	2025-06-06	7:39:01 p.m.	29.90					
24	2025-06-06	7:59:01 p.m.	29.88					
25	2025-06-06	8:19:01 p.m.	29.72					

Imagen 12 Se muestra la interfaz que se programó en Apps Scripts del Dispositivo 4 Miniaturizado. Por fines de seguridad no se muestra el nombre del participante.

4.2 Análisis del comportamiento del dispositivo

Se utilizó un enfoque descriptivo para realizar el análisis de los datos registrados, utilizando gráficas de temperatura en función del tiempo. Para determinar el estado de uso del aparato, se estableció un criterio basado en un umbral térmico. Se consideró que el dispositivo se encontraba en uso cuando la temperatura registrada se encontraba dentro del rango de 34°C a 38°C, correspondiente al contacto con la piel del paciente. Todos los valores fuera de este rango fueron clasificados como periodos de no uso.

Para este tipo de análisis se programó la validación de uso otorgando un valor "1" a los datos que cumplieran el criterio de temperatura y un valor "0" a los que estuvieran fuera de este criterio, permitiendo así usar los datos para graficar los resultados. Se hicieron 5 ventanas de análisis cada una cumpliendo los requerimientos de visualización para su posterior análisis:

- Uso/Día

Esta pestaña permite al usuario hacer un análisis por día, se selecciona la fecha que quiere revisar y después el programa busca toda la información de la base de datos con referencia a la fecha seleccionada. Una vez hecho eso se aplica el criterio y se otorgan los valores para que por último se grafiquen los resultados (Imagen 13).

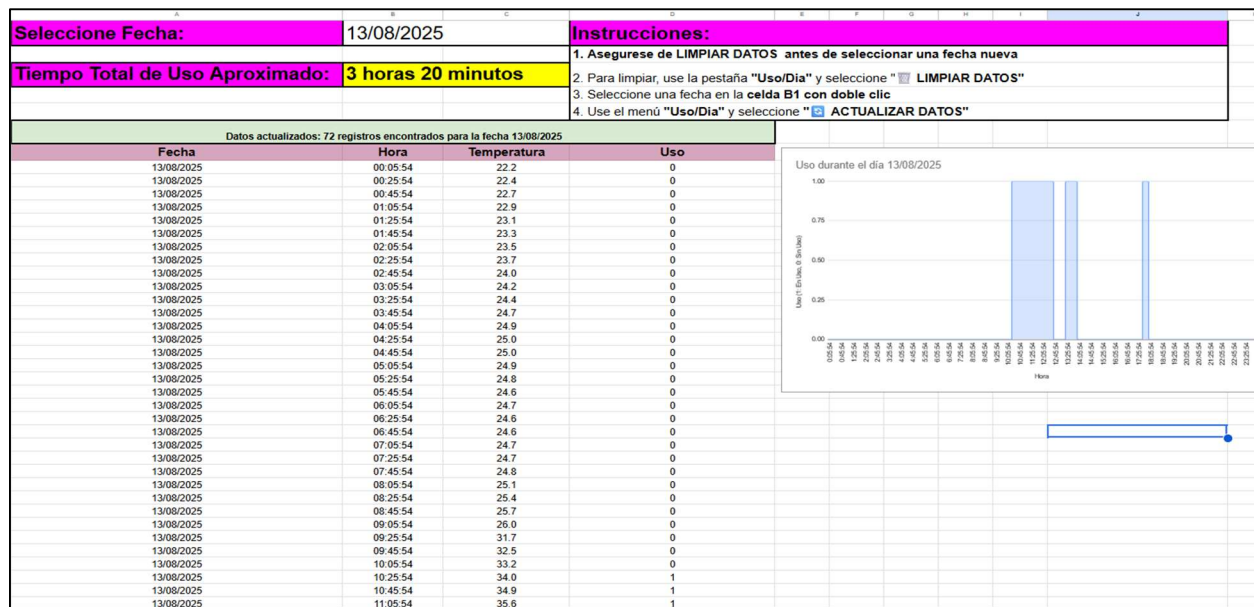


Imagen 13 Interfaz para el análisis del Uso del dispositivo por día seleccionado.

- Uso/Rango

Esta pestaña hace el análisis por un rango de fechas definido, es decir el usuario tiene que colocar las fechas de inicio y fin que quiera que el programa le muestre, de igual manera una vez que el programa encuentre todos los datos dentro del rango este aplica el criterio otorgando los valores a los resultados y así permitir graficar dichos datos (Imagen 14).

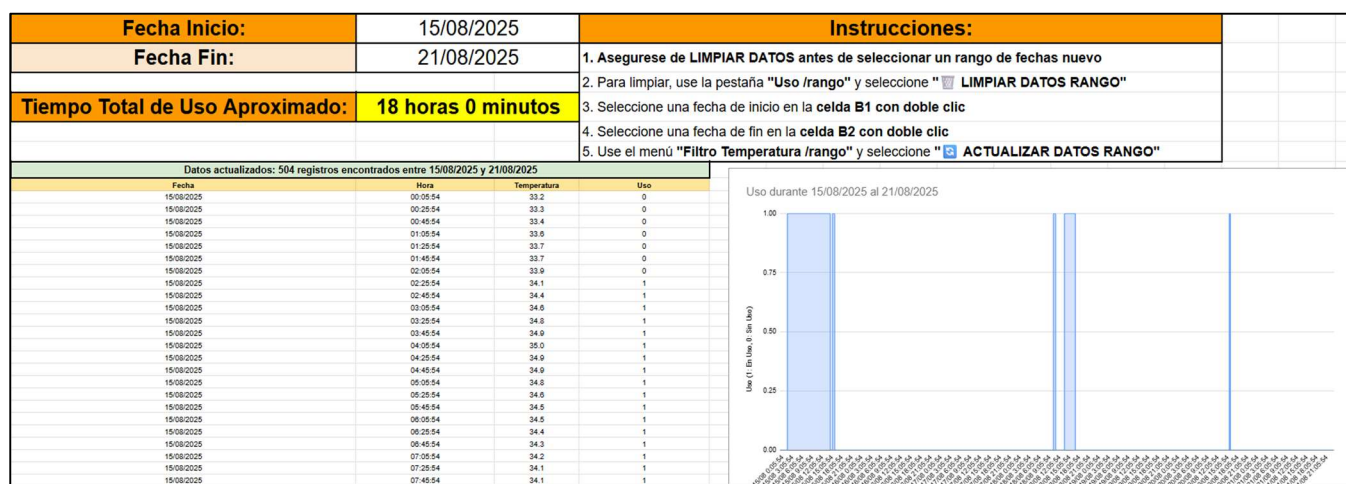


Imagen 14 Interfaz para el análisis del Uso del dispositivo por rango de días seleccionado.

- Tiempo de Uso

Este apartado genera un resumen general de todos los resultados obtenidos a lo largo de la primera y última fecha registrada. Asimismo, compara el tiempo total encendido y el tiempo total de uso, dando el porcentaje de uso (Imagen 15).

TIEMPO TOTAL DE USO				RESUMEN DE USO	
Datos actualizados: 3400 registros procesados				Nombre del paciente:	
Fecha	Hora	Temperatura	Validación de Uso	Fecha de inicio de Tratamiento:	
01/08/2025	10:45:54	25.8	0	Fecha de Consulta	15/9/2025
01/08/2025	11:05:54	25.7	0	Tiempo total encendido:	1133 horas 20 minutos
01/08/2025	11:25:54	25.5	0	Tiempo total de uso:	138 horas 20 minutos
01/08/2025	11:45:54	25.4	0	Porcentaje de uso:	12%
01/08/2025	12:05:54	25.3	0	Instrucciones: 1. Asegurese de LIMPIAR DATOS antes de generar un nuevo Análisis 2. Para limpiar, use la pestaña "Tiempo de Uso" y seleccione "  LIMPIAR DATOS RANGO" 3. Use el menú "Tiempo de uso" y seleccione "  ACTUALIZAR DATOS RANGO"	
01/08/2025	12:25:54	25.2	0		
01/08/2025	12:45:54	25.0	0		
01/08/2025	13:05:54	24.9	0		
01/08/2025	13:25:54	24.7	0		
01/08/2025	13:45:54	24.4	0		
01/08/2025	14:05:54	24.1	0		
01/08/2025	14:25:54	23.8	0		
01/08/2025	14:45:54	23.2	0		
01/08/2025	15:05:54	23.5	0		
01/08/2025	15:25:54	24.0	0		
01/08/2025	15:45:54	24.9	0		
01/08/2025	16:05:54	24.9	0		
01/08/2025	16:25:54	25.4	0		
01/08/2025	16:45:54	25.0	0		
01/08/2025	17:05:54	24.8	0		
01/08/2025	17:25:54	24.5	0		
01/08/2025	17:45:54	24.1	0		
01/08/2025	18:05:54	24.0	0		
01/08/2025	18:25:54	23.9	0		
01/08/2025	18:45:54	23.8	0		
01/08/2025	19:05:54	23.7	0		
01/08/2025	19:25:54	23.7	0		
01/08/2025	19:45:54	23.5	0		
01/08/2025	20:05:54	23.3	0		
01/08/2025	20:25:54	23.1	0		

Imagen 15 Interfaz para el resumen general del tratamiento de la fecha inicial y la última registrada.

- Temperatura/Día

Este apartado permite cuantificar la temperatura a lo largo del tiempo, donde la interfaz busca la información del día seleccionado por el usuario y este mismo grafica los datos filtrados (Imagen 16).

Seleccione Fecha:		15/08/2025	Instrucciones:	
			1. Asegurese de LIMPIAR DATOS antes de seleccionar una fecha nueva 2. Para limpiar, use la pestaña "Temperatura/Día" y seleccione "  LIMPIAR DATOS" 3. Seleccione una fecha en la celda B1 con doble clic 4. Use el menú "Filtro Temperatura" y seleccione "  ACTUALIZAR DATOS"	
Datos actualizados: 72 registros encontrados para la fecha 15/08/2025				
Fecha	Hora	Temperatura	Temperatura durante el día 15/08/2025 	
15/08/2025	00:05:54	33.2		
15/08/2025	00:25:54	33.3		
15/08/2025	00:45:54	33.4		
15/08/2025	01:05:54	33.6		
15/08/2025	01:25:54	33.7		
15/08/2025	01:45:54	33.7		
15/08/2025	02:05:54	33.9		
15/08/2025	02:25:54	34.1		
15/08/2025	02:45:54	34.4		
15/08/2025	03:05:54	34.6		
15/08/2025	03:25:54	34.8		
15/08/2025	03:45:54	34.9		
15/08/2025	04:05:54	35.0		
15/08/2025	04:25:54	34.9		
15/08/2025	04:45:54	34.9		
15/08/2025	05:05:54	34.8		
15/08/2025	05:25:54	34.6		
15/08/2025	05:45:54	34.5		
15/08/2025	06:05:54	34.5		
15/08/2025	06:25:54	34.4		

Imagen 16 Interfaz que permite graficar por día la temperatura en comparación al tiempo.

- Temperatura/Rango

Este apartado permite cuantificar la temperatura a lo largo del tiempo, a diferencia del anterior con esta interfaz podemos graficar con una fecha inicial y una fecha final que seleccione el usuario. El código filtra la información del rango proporcionado y entrega la gráfica (Imagen 17).



Imagen 17 Interfaz que permite graficar por rango de días la temperatura en comparación al tiempo.

Con estas interfaces y representación de los datos, se pueden observar dos comportamientos del dispositivo: un rango de temperatura estable que podemos asociar al uso del dispositivo, y valores fuera de este rango corresponden a periodos sin contacto con la piel del paciente.

Estos resultados permiten validar que la variable seleccionada (temperatura) es adecuada para determinar el uso del dispositivo, así como la estabilidad del sistema de medición.

4.3 Cuantificación del tiempo de uso

Con base en la clasificación de los datos en periodos de uso y no uso, se realizó la sumatoria del tiempo total del uso diario del dispositivo.

Este procesamiento permitió obtener una evaluación cuantitativa al poder calcular el número de horas de uso por día durante el periodo de evaluación, facilitando la toma de decisiones e indicadores para evaluar el avance con el tratamiento. Los resultados obtenidos se representan en las siguientes imágenes.

Participante 1:

En la Imagen 19 se puede ver el resumen de tiempo de uso del dispositivo 1; en poco más de treinta días, se tuvo un 12% del tiempo total que el dispositivo estuvo encendido (dato visible en la imagen 18). Se puede suponer que cuando se acercaba la fecha de revisión médica, los tutores de los pacientes usaban el dispositivo por más tiempo.

RESUMEN DE USO	
Nombre del paciente:	
Fecha de inicio de Tratamiento:	1/8/2025
Fecha de Consulta	15/9/2025
Tiempo total encendido:	1133 horas 20 minutos
Tiempo total de uso:	138 horas 20 minutos
Porcentaje de uso:	12%

Imagen 18 Resumen de uso del dispositivo 1.

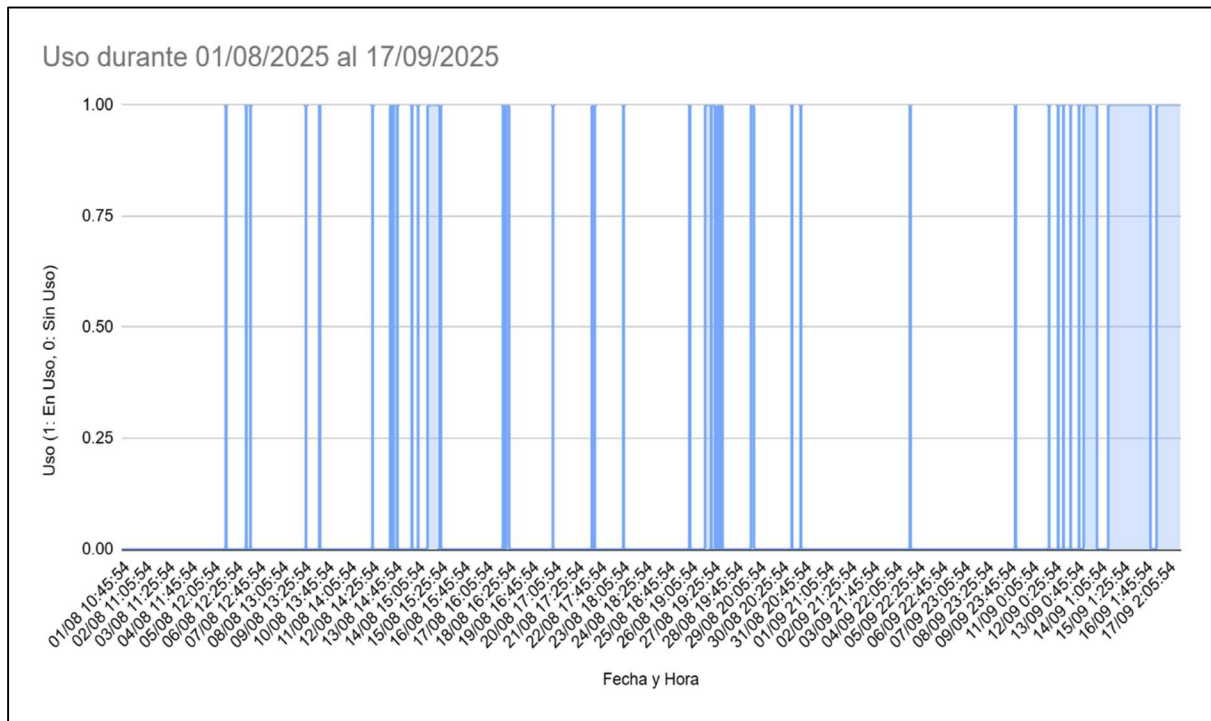


Imagen 19 Gráfica que representa el tiempo de uso en el periodo de registro tomado por el dispositivo 1.

En la imagen 20 se puede observar la variable de temperatura a lo largo del tiempo; esta comparativa permite observar que se muestran oscilaciones rápidas y repetitivas que sugieren un ciclo día/noche claro, con temperaturas bajas en la madrugada ($\sim 22^{\circ}\text{C}$) y altas durante el día ($\sim 30\text{--}36^{\circ}\text{C}$). Hay una ligera tendencia al alza hacia finales del periodo (segunda semana de septiembre), con temperaturas sostenidas más altas ($\sim 33\text{--}38^{\circ}\text{C}$). La primera mitad del periodo (agosto) muestra fluctuaciones más erráticas, mientras que septiembre parece algo más estable, aunque con picos más altos.

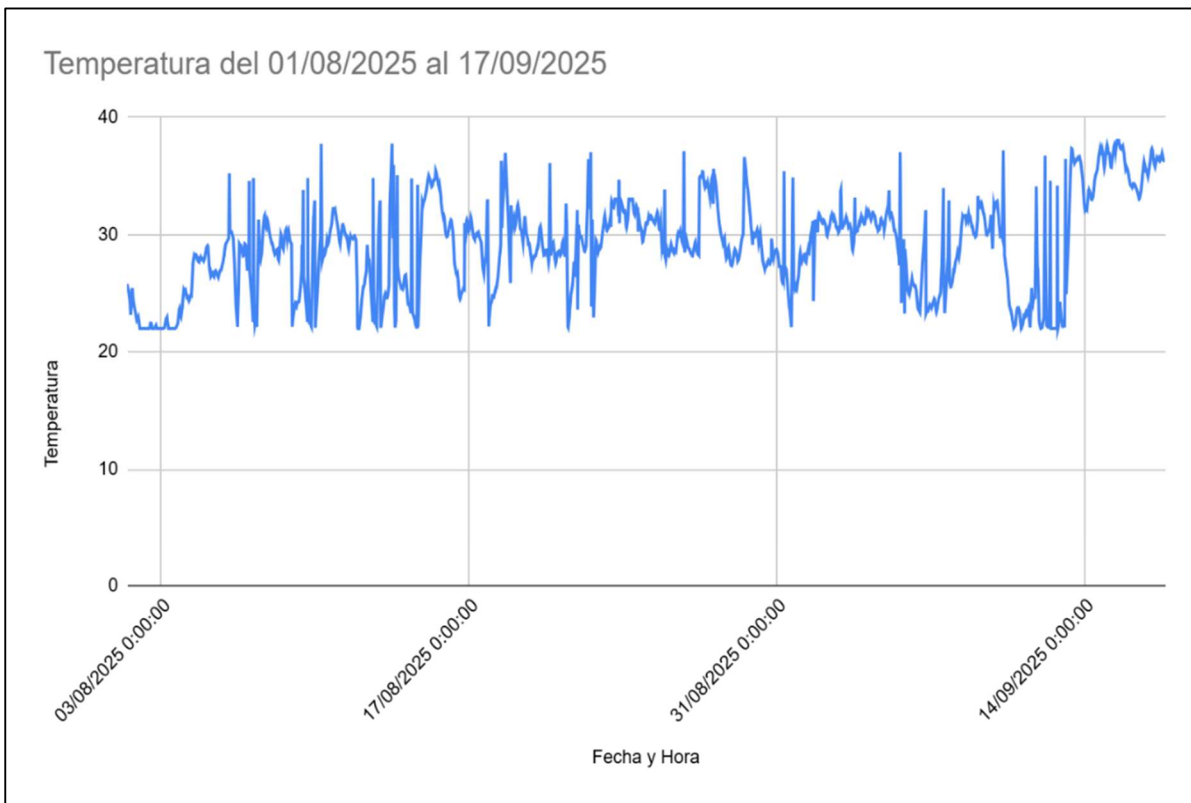


Imagen 20 Grafica de la Temperatura a lo largo del Tiempo de encendido del dispositivo 1.

Participante 2:

En la Imagen 22 se puede ver el resumen de tiempo de uso del dispositivo 2; en un periodo de veinte días se tuvo un uso del 20% del tiempo total que el dispositivo estuvo encendido (dato visible en la imagen 21).

RESUMEN DE USO	
Nombre del paciente:	
Fecha de inicio de Tratamiento	6/6/2025
Fecha de Consulta:	25/6/2025
Tiempo total encendido:	418 horas 40 minutos
Tiempo total de uso:	84 horas 20 minutos
Porcentaje de uso:	20%

Imagen 21 Resumen de uso del dispositivo 2.

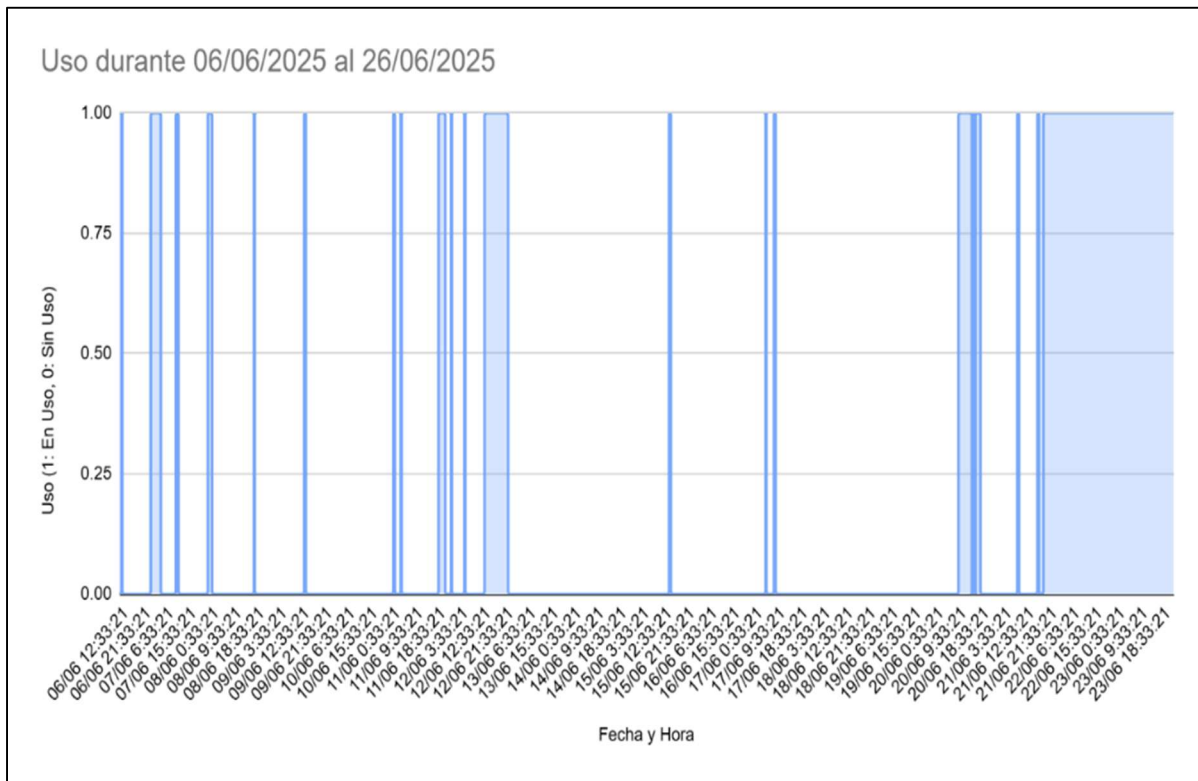


Imagen 22 Gráfica que representa el tiempo de uso en el periodo de registro tomado por el dispositivo 2.

En la imagen 23 se puede observar la variable de temperatura a lo largo del tiempo; esta comparativa permite que se identifiquen dos fases claramente diferenciadas: durante la primera mitad del periodo se observa una alta variabilidad con oscilaciones bruscas entre $\sim 22^{\circ}\text{C}$ y $\sim 40^{\circ}\text{C}$, sugestivas de ciclos intermitentes de uso o climatización. A partir del 18 de junio, las fluctuaciones disminuyen y la temperatura adopta una tendencia ascendente sostenida, manteniéndose entre 34°C y 37°C hacia el final del registro

Este incremento progresivo y sostenido en la segunda mitad del periodo representa un punto de atención, ya que podría indicar un aumento en la intensidad de uso del equipo o una reducción en su capacidad de disipación de calor, lo cual recomendaría una revisión técnica preventiva.

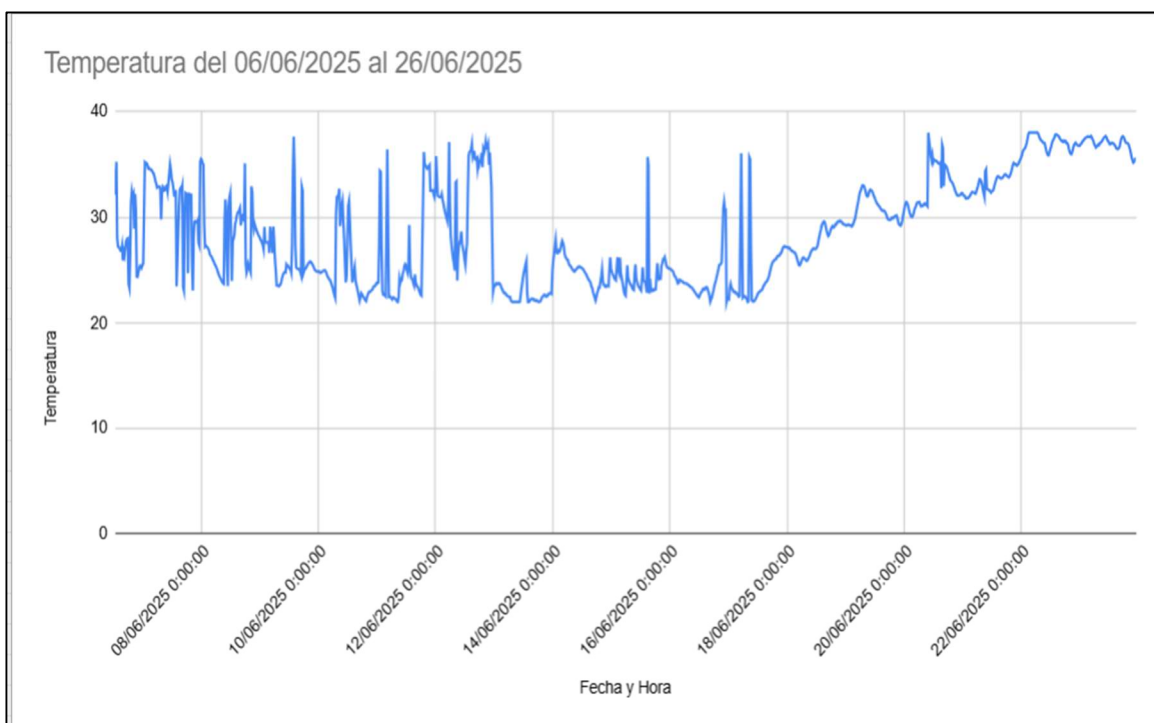


Imagen 23 Grafica de la Temperatura a lo largo del Tiempo de encendido del dispositivo 2.

Participante 3:

En la Imagen 25 se puede ver el resumen de tiempo de uso del dispositivo 4; en un periodo de aproximadamente 30 días se tuvo un uso del 20% del tiempo total que el dispositivo estuvo encendido (dato visible en la imagen 24).

RESUMEN DE USO	
Nombre del paciente:	
Fecha de inicio de Tratamiento:	6/6/2025
Fecha de Consulta:	5/7/2025
Tiempo total encendido:	685 horas
Tiempo total de uso:	136 horas 40 minutos
Porcentaje de uso:	20%

Imagen 24 Resumen de uso del dispositivo 4.

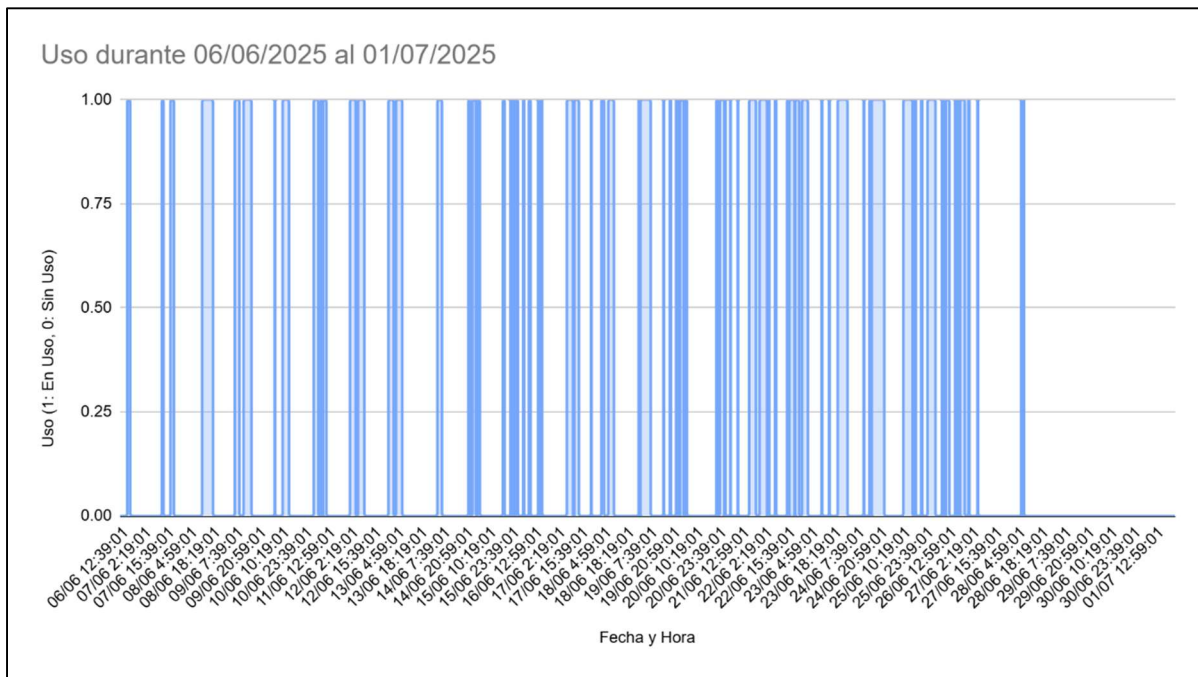


Imagen 25 Gráfica que representa el tiempo de uso en el periodo de registro tomado por el dispositivo 4.

En la imagen 26 se muestra el comportamiento térmico del dispositivo 4 con temperaturas que oscilaron entre aproximadamente 22°C y 40°C.

A diferencia del Dispositivo 2, este equipo presenta una variabilidad alta y constante durante todo el periodo, con oscilaciones frecuentes entre ~25°C y ~38°C que se mantienen de forma regular a lo largo de las casi cuatro semanas registradas. Este patrón uniforme sugiere un uso continuo y recurrente del dispositivo, con ciclos térmicos diarios bien establecidos.

El único cambio notable ocurre hacia el final del registro, donde se observa una caída brusca y sostenida a valores cercanos a los 22°C, sin recuperación posterior. Esto podría indicar el apagado definitivo del equipo, una interrupción en el suministro eléctrico, o el fin del periodo de monitoreo.

En términos generales, el comportamiento del dispositivo 4 refleja una operación estable y predecible, sin las anomalías de sobrecalentamiento sostenido observadas en el dispositivo 2, aunque la caída abrupta al final del periodo merece verificación.

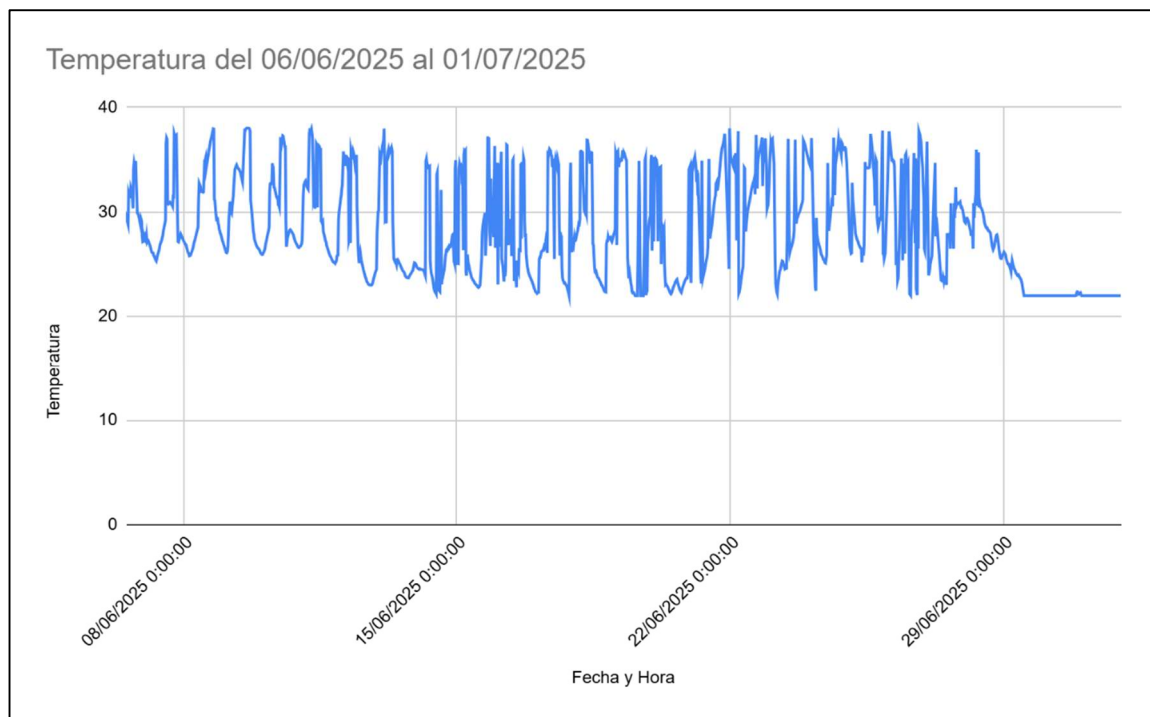


Imagen 26 Grafica de la Temperatura a lo largo del Tiempo de encendido del dispositivo 4.

Al comparar el tiempo de uso registrado con el tiempo recomendado, se identificó que el paciente no alcanzó de manera constante las 14 horas diarias sugeridas para el tratamiento. Este resultado es consistente con lo reportado en la literatura, donde se menciona que el apego terapéutico en pacientes pediátricos suele ser menor al indicado por el personal médico. La información obtenida mediante el dispositivo permitió evidenciar esta discrepancia de manera objetiva, eliminando la subjetividad asociada al interrogatorio tradicional. De esta forma, el sistema desarrollado proporciona una herramienta útil para evaluar el cumplimiento del tratamiento y apoyar la toma de decisiones clínicas basadas en datos reales.

4.4 Desempeño del dispositivo

En términos de funcionamiento, el dispositivo cumplió con los objetivos planteados, logrando registrar información de manera continua, identificar periodos de uso y no uso, además de generar datos para su posterior análisis con las interfaces desarrolladas para este fin.

Durante las pruebas, se identificaron áreas de mejora relacionadas con la ergonomía, el tamaño del dispositivo y el tiempo de transferencia de datos. Estas observaciones llevaron a un proceso de rediseño enfocado en la miniaturización y optimización del sistema, logrando una versión más compacta y funcional (Imágenes 27 y 28); para ello se sustituyeron componentes y se adaptaron partes del código. Los tres principales cambios fueron:

- Reduccion de tamaño.
- Tiempos de espera en la descarga de datos.
- Reubicación del dispositivo.



Imagen 27 Dispositivo en su versión final.

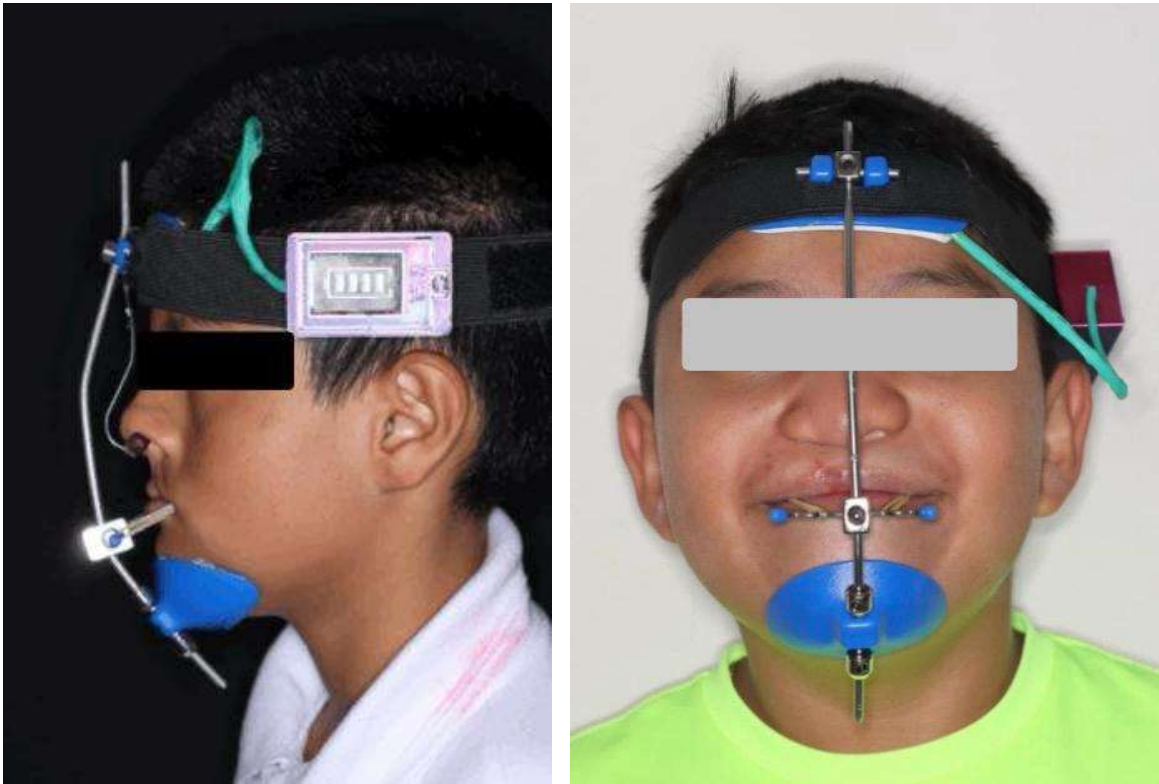


Imagen 28 Dispositivo en su versión final colocado en los participantes durante condiciones reales de uso.

Esta configuración refleja el proceso de optimización del diseño, incluyendo la selección de una tarjeta de procesamiento más compacta (ESP32-C3), una batería de menor tamaño y una carcasa optimizada mediante manufactura aditiva, mejorando la portabilidad y apego del dispositivo por parte del paciente (Imagen 29).

Desarrollar este dispositivo representa una aportación relevante ya que es una demostración de la importancia que tiene la ingeniería biomédica aplicada, al ofrecer una solución accesible para la medición del apego terapéutico. El sistema permite transformar una variable física, como la temperatura, en un indicador cuantificable del uso del tratamiento, proporcionando información objetiva que puede ser utilizada por el personal médico.

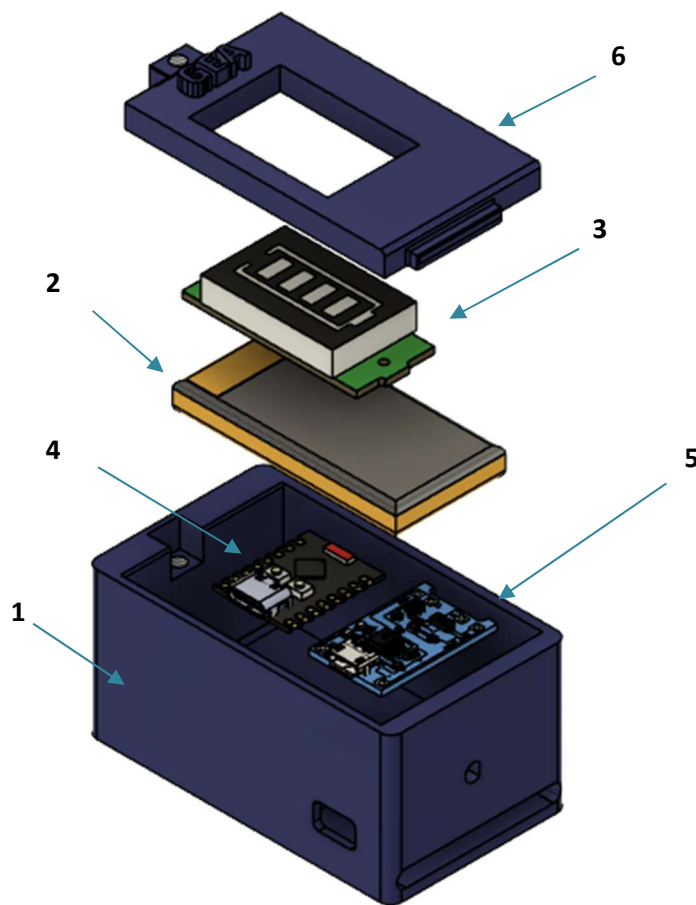


Imagen 29 Vista explosionada de la versión final del dispositivo, mostrando sus componentes principales: (1) Caja (2) Batería LiPo 650 mAh (3) Indicador de LEDs (4) ESP32C3 (5) Cargador de baterías de litio (6) Tapa.

El impacto en el contexto clínico radica en la posibilidad de mejorar la evaluación del apego terapéutico mediante el uso de herramientas tecnológicas accesibles. El dispositivo permite al personal clínico contar con información objetiva sobre el comportamiento y dedicación del paciente, lo que ayuda directamente a una mejor toma de decisiones y seguimiento del tratamiento.

Capítulo 5 Conclusiones

5.1 Logros alcanzados respecto a los objetivos planteados

El objetivo principal del proyecto fue desarrollar un dispositivo capaz de cuantificar de manera objetiva y cuantitativa el apego al tratamiento de ortodoncia infantil mediante el registro del tiempo real de uso de una mascarilla facial. A partir de los resultados obtenidos, se logró desarrollar un sistema funcional que permite identificar los periodos de uso y no uso mediante la medición de temperatura corporal, transformando una variable física en información útil para la toma de decisiones del tratamiento.

Asimismo, se cumplió con el objetivo de generar una alternativa de bajo costo respecto a los dispositivos comerciales disponibles para este propósito. El sistema desarrollado fue capaz de almacenar información durante periodos prolongados, generar registros históricos y facilitar su análisis mediante herramientas digitales accesibles.

Otro logro importante fue la evolución del diseño inicial hacia una versión miniaturizada, mejorando aspectos de portabilidad, comodidad y aceptación por parte de los pacientes pediátricos. Este proceso permitió validar tanto el funcionamiento técnico del dispositivo como su viabilidad de implementación en su entorno clínico real.

5.2 Implicaciones de los logros para el campo de la ingeniería

Los resultados obtenidos demuestran cómo la Ingeniería en Sistemas Biomédicos puede contribuir directamente a la solución de problemas en un entorno clínico y hospitalario mediante el desarrollo de tecnología accesible y centrada en las necesidades del usuario. Este proyecto evidencia que es posible utilizar componentes electrónicos comerciales, técnicas de manufactura aditiva y herramientas de programación para desarrollar dispositivos con aplicaciones médicas específicas. Además, muestra la

importancia de transformar variables físicas medibles en indicadores que permitan apoyar la toma de decisiones clínicas basadas en evidencia.

De igual forma, el trabajo destaca el papel de la ingeniería como un puente entre la tecnología y el área médica, esto permite generar soluciones adaptadas a contextos hospitalarios donde las alternativas comerciales pueden resultar poco accesibles económicamente.

5.3 Lecciones aprendidas durante el desarrollo del proyecto

Una de las principales lecciones aprendidas fue comprender que el éxito de un dispositivo biomédico no depende únicamente de su funcionamiento técnico. Aspectos como la ergonomía, la comodidad del paciente, la facilidad de uso y la aceptación del usuario final tienen un impacto significativo en la viabilidad de una solución tecnológica.

Existe una gran importancia de la validación en condiciones reales de uso. Aunque el diseño inicial cumplía con los requerimientos funcionales, la implementación con pacientes permitió identificar oportunidades de mejora relacionada con la portabilidad del dispositivo, dando origen a un proceso de rediseño y optimización.

5.4 Recomendaciones para futuros trabajos

Como trabajo futuro, se recomienda ampliar la validación del dispositivo en un mayor número de pacientes y durante periodos más prolongados, con el objetivo de obtener información más amplia sobre el comportamiento del apego terapéutico en diferentes grupos de edad y condiciones clínicas.

Asimismo, sería conveniente el uso de algoritmos de procesamiento automático que permitan identificar patrones de uso, calcular indicadores de apego terapéutico y generar reportes sin intervención manual, como un resumen automático al solo descargar la información. Otra línea de desarrollo consiste en implementar plataformas de monitoreo remoto mediante aplicaciones móviles o sistemas web que faciliten el seguimiento clínico por parte del personal médico.

También se recomienda continuar con la optimización del diseño electrónico y mecánico para reducir aún más las dimensiones del dispositivo, incrementar la autonomía de la batería y mejorar la experiencia de uso para pacientes pediátricos.

5.5 Impacto del proyecto en la práctica profesional personal

Desde una perspectiva profesional, este proyecto representó la oportunidad de aplicar de manera integral los conocimientos adquiridos durante la formación como Ingeniero en Sistemas Biomédicos. Su desarrollo involucró actividades relacionadas con diseño electrónico, programación, manufactura aditiva, procesamiento de datos y trabajo multidisciplinario con profesionales de la salud. La experiencia permitió fortalecer habilidades técnicas y de gestión de proyectos, así como comprender la importancia de diseñar soluciones tecnológicas enfocadas en resolver necesidades clínicas reales.

Además, reafirmó el valor de la ingeniería biomédica como una disciplina capaz de generar innovaciones que contribuyan al mejoramiento de la atención médica y la calidad de vida de los pacientes. Finalmente, este proyecto permitió consolidar una visión más amplia sobre el proceso de desarrollo de dispositivos médicos o *wearables*, desde la identificación de una necesidad clínica hasta la validación de una solución funcional en un entorno hospitalario.

Índice de imágenes

<i>Imagen 1 Mascarilla implementada en el tratamiento de ortodoncia.</i>	11
<i>Imagen 2 Idealización y conceptualización del dispositivo</i>	12
<i>Imagen 3 Idealización y conceptualización del dispositivo</i>	14
<i>Imagen 4 Primer prototipo en impresión 3D</i>	15
<i>Imagen 5 Primeros prototipos del dispositivo</i>	15
<i>Imagen 6 Vista explosionada de la primera versión del proyecto, además de los componentes que se usaron por primera vez. (1) Caja (2) Batería Litio 3300 mAh (3) Indicador de LEDs (4) ESP32 (5) Cargador de baterías de litio (6) Tapa.</i>	16
<i>Imagen 7 Primera ronda de pruebas con participantes del caso clínico del área de estomatología.</i>	17
<i>Imagen 8 Diagrama de componentes electrónicos.</i>	21
<i>Imagen 9 Interfaz de la aplicación de descarga de datos.</i>	23
<i>Imagen 10 Se muestra la interfaz que se programó en Apps Scripts del Dispositivo 1 Miniaturizado. Por fines de seguridad no se muestra el nombre del participante.</i>	24
<i>Imagen 11 Se muestra la interfaz que se programó en Apps Scripts del Dispositivo 2 Miniaturizado. Por fines de seguridad no se muestra el nombre del participante.</i>	25
<i>Imagen 12 Se muestra la interfaz que se programó en Apps Scripts del Dispositivo 4 Miniaturizado. Por fines de seguridad no se muestra el nombre del participante.</i>	26
<i>Imagen 13 Interfaz para el análisis del Uso del dispositivo por día seleccionado.</i>	27
<i>Imagen 14 Interfaz para el análisis del Uso del dispositivo por rango de días seleccionado.</i>	28
<i>Imagen 15 Interfaz para el resumen general del tratamiento de la fecha inicial y la última registrada.</i>	29
<i>Imagen 16 Interfaz que permite graficar por día la temperatura en comparación al tiempo.</i>	29
<i>Imagen 17 Interfaz que permite graficar por rango de días la temperatura en comparación al tiempo.</i>	30
<i>Imagen 18 Resumen de uso del dispositivo 1.</i>	31
<i>Imagen 19 Gráfica que representa el tiempo de uso en el periodo de registro tomado por el dispositivo 1.</i>	32
<i>Imagen 20 Grafica de la Temperatura a lo largo del Tiempo de encendido del dispositivo 1.</i>	33
<i>Imagen 21 Resumen de uso del dispositivo 2.</i>	33
<i>Imagen 22 Gráfica que representa el tiempo de uso en el periodo de registro tomado por el dispositivo 2.</i>	34
<i>Imagen 23 Grafica de la Temperatura a lo largo del Tiempo de encendido del dispositivo 2.</i>	35
<i>Imagen 24 Resumen de uso del dispositivo 4.</i>	35

<i>Imagen 25 Gráfica que representa el tiempo de uso en el periodo de registro tomado por el dispositivo 4.</i>	36
<i>Imagen 26 Grafica de la Temperatura a lo largo del Tiempo de encendido del dispositivo 4.</i>	37
<i>Imagen 27 Dispositivo en su versión final.</i>	38
<i>Imagen 28 Dispositivo en su versión final colocado en los participantes durante condiciones reales de uso.</i>	39
<i>Imagen 29 Vista explosionada de la versión final del dispositivo, mostrando sus componentes principales:</i> <i>(1) Caja (2) Batería LiPo 650 mAh (3) Indicador de LEDs (4) ESP32C3 (5) Cargador de baterías de litio (6)</i> <i>Tapa.</i>	40

Anexo 1 Código de operación del dispositivo

```
// -----  
// LIBRERÍAS  
// Cada #include incorpora un módulo externo necesario para el sistema.  
// -----  
#include <WiFi.h>           // Control nativo de WiFi del ESP32  
#include <WiFiManager.h>    // Portal cautivo para configurar credenciales  
sin recompilar  
#include <HTTPClient.h>      // Peticiones HTTP para enviar datos a Google  
Sheets  
#include <ESP32Time.h>       // Reloj en tiempo real (RTC) interno del ESP32  
#include <SPIFFS.h>          // Sistema de archivos en memoria flash  
#include <FS.h>              // Tipos de archivo base (File, etc.)  
#include <NTPClient.h>       // Cliente para sincronizar hora por internet  
(NTP)  
#include <WiFiUdp.h>         // Protocolo UDP requerido por NTPClient  
#include <driver/adc.h>      // Control avanzado del ADC (atenuación del pin)  
#include <math.h>            // Funciones log() y pow() para Steinhart-Hart  
  
// -----  
// CONFIGURACIÓN DEL SENSOR NTC  
// El termistor NTC se conecta al pin GPIO 34 en divisor de voltaje con R1.  
// Los coeficientes c1, c2, c3 son los de la ecuación de Steinhart-Hart,  
// calibrados para este termistor específico. La ecuación calcula:  
//  $1/T(K) = c1 + c2 \cdot \ln(R) + c3 \cdot \ln(R)^3$   
// -----  
const int pinNTC = 34;      // Pin analógico donde está conectado el NTC  
float R1 = 100000;          // Resistencia de referencia del divisor:  
100 kΩ  
float logR2, R2, TEMPERATURA; // Variables de cálculo (resistencia y  
temperatura)  
float c1 = 2.114990448e-03, // Coeficiente A de Steinhart-Hart  
(calibrado)  
      c2 = 0.3832381228e-04, // Coeficiente B de Steinhart-Hart  
(calibrado)  
      c3 = 5.228061052e-07;  // Coeficiente C de Steinhart-Hart  
(calibrado)  
  
// -----  
// GESTIÓN DE TIEMPO Y MODO DEEP SLEEP  
// RTC_DATA_ATTR: esta variable sobrevive los ciclos de deep sleep,  
// guardándose en la memoria RTC que no se apaga. Permite llevar  
// registro del tiempo aunque no haya internet en el siguiente ciclo.  
// El offset -6*3600 ajusta UTC al huso horario Centro (México, UTC-6).  
// -----  
RTC_DATA_ATTR time_t rtcEpochTime = 0; // Tiempo Unix persistente entre  
sleeps
```

```

WiFiManager wifiManager;           // Maneja la conexión WiFi
automáticamente
WiFiUDP ntpUDP;                     // Transporte UDP para el cliente NTP
NTPClient timeClient(ntpUDP, "pool.ntp.org", -6 * 3600); // UTC-6 (Centro
MX)
ESP32Time rtc;                      // Objeto del reloj interno del ESP32

// Duración del deep sleep: 20 minutos
// intervaloDormir en microsegundos (unidad que usa esp_deep_sleep())
// segundosIntervalo en segundos (para sumar al epoch cuando no hay WiFi)
const uint64_t intervaloDormir = 20 * 60 * 1000000ULL;
const uint64_t segundosIntervalo = 20 * 60;

// -----
// ENDPOINT DE GOOGLE SHEETS
// URL del Google Apps Script publicado como aplicación web.
// *** REEMPLAZAR con la URL propia al reimplementar el proyecto ***
// -----
String urlGoogleSheets = "https://script.google.com/macros/s/<TU_ID>/exec";

// -----
// FUNCIÓN: getAverageVoltage()
// Toma 'samples' lecturas del ADC con 5 ms de pausa entre cada una
// para reducir el ruido eléctrico. Convierte el promedio de los valores
// digitales (0-4095) a voltaje real (0-3.3 V).
// -----
float getAverageVoltage(int pin, int samples = 10) {
    float sum = 0;
    for (int i = 0; i < samples; i++) {
        sum += analogRead(pin); // Acumula lecturas crudas del ADC
        delay(5);               // Pausa para evitar muestras correlacionadas
    }
    return (sum / samples) * (3.3 / 4095.0); // Promedio convertido a voltaje
}

// -----
// FUNCIÓN: sincronizarHora()
// Se conecta al servidor pool.ntp.org y descarga la hora exacta.
// Guarda el tiempo en rtcEpochTime (persiste en deep sleep) y en
// el RTC interno. Retorna true si tuvo éxito, false si falló.
// -----
bool sincronizarHora() {
    timeClient.begin();
    if (timeClient.forceUpdate()) { // Fuerza actualización inmediata
        rtcEpochTime = timeClient.getEpochTime(); // Guarda en memoria RTC
        rtc.setTime(rtcEpochTime); // Actualiza el reloj interno
        Serial.println("Hora sincronizada con NTP.");
        return true;
    } else {
        Serial.println("Error al sincronizar hora NTP.");
        return false;
    }
}

```

```

// -----
// FUNCIÓN: restaurarHoraSinInternet()
// Cuando no hay WiFi, la hora se estima sumando el intervalo de sleep
// (20 min) al tiempo guardado. Garantiza marcas de tiempo continuas
// aunque el dispositivo esté fuera de línea.
// -----
void restaurarHoraSinInternet() {
    rtcEpochTime += segundosIntervalo; // Avanza 20 minutos al tiempo guardado
    rtc.setTime(rtcEpochTime);          // Aplica el tiempo estimado al RTC
    Serial.println("Hora restaurada desde RTC sin internet.");
}

// -----
// FUNCIÓN: guardarDatoLocal()
// Escribe una línea CSV al archivo /datos.csv en la memoria flash.
// Usa FILE_APPEND para no sobrescribir registros anteriores.
// Formato de cada línea: YYYY-MM-DD,HH:MM:SS,##.##
// -----
void guardarDatoLocal(float temperatura, String fecha, String hora) {
    File file = SPIFFS.open("/datos.csv", FILE_APPEND); // Abre en modo
    agregar
    if (!file) {
        Serial.println("No se pudo abrir el archivo para escritura");
        return;
    }
    file.printf("%s,%s,%.2f\n", fecha.c_str(), hora.c_str(), temperatura);
    file.close(); // Cierra inmediatamente para proteger integridad
    Serial.println("Dato guardado localmente");
}

// -----
// FUNCIÓN: enviarDatoGoogleSheets()
// Construye la URL con los datos como parámetros query string y hace
// una petición HTTP GET al Apps Script de Google Sheets.
// Retorna true si el servidor respondió (código > 0), false si hubo error.
// -----
bool enviarDatoGoogleSheets(float temperatura, String fecha, String hora) {
    HTTPClient http;
    // URL final: .../exec?fecha=...&hora=...&temperatura=...
    String url = urlGoogleSheets + "?fecha=" + fecha + "&hora=" + hora
        + "&temperatura=" + String(temperatura, 2);
    http.begin(url);
    int httpCode = http.GET();          // Ejecuta la petición
    if (httpCode > 0) {
        Serial.println("Datos enviados a Google Sheets:");
        Serial.println(http.getString()); // Respuesta del servidor
        http.end();
        return true;
    } else {
        Serial.print("Error al enviar datos: ");
        Serial.println(httpCode);          // Código de error HTTP
        http.end();
        return false;
    }
}

```

```

// -----
// FUNCIÓN: enviarDatosPendientes()
// Lee /datos.csv y reintentar enviar a Google Sheets cada registro
// que no pudo enviarse en ciclos anteriores por falta de WiFi.
// Los registros fallidos se conservan en el archivo para el siguiente
// ciclo; los exitosos se eliminan. Si escucharUART=true, también
// atiende el comando GET por puerto serial durante el proceso.
// -----
void enviarDatosPendientes(bool escucharUART=false) {
    if (!SPIFFS.exists("/datos.csv")) return; // Nada que enviar

    File file = SPIFFS.open("/datos.csv", FILE_READ);
    if (!file) return;

    String nuevosDatos = ""; // Acumula solo los registros que NO se enviaron
    while (file.available()) {
        String linea = file.readStringUntil('\n');
        if (linea.length() == 0) continue;

        // Parsea la línea CSV: fecha,hora,temperatura
        int p1 = linea.indexOf(',');
        int p2 = linea.indexOf(',', p1 + 1);
        String fecha      = linea.substring(0, p1);
        String hora       = linea.substring(p1 + 1, p2);
        float temperatura = linea.substring(p2 + 1).toFloat();

        // Mientras envía, escucha si llega comando GET por serial
        if (escucharUART && Serial.available()) {
            String comando = Serial.readStringUntil('\n');
            comando.trim();
            if (comando == "GET") { enviarDatosPorUART(); }
        }

        if (!enviarDatoGoogleSheets(temperatura, fecha, hora)) {
            nuevosDatos += linea + "\n"; // Falló: se conserva para reintentar
        }
    }
    file.close();

    // Reescribe el archivo con solo los registros pendientes
    file = SPIFFS.open("/datos.csv", FILE_WRITE);
    if (!file) return;
    file.print(nuevosDatos);
    file.close();
}

// -----
// FUNCIÓN: enviarDatosPorUART()
// Imprime todos los datos almacenados en /datos.csv por el puerto
// serial (USB). Útil para recuperar datos sin WiFi o para diagnóstico.
// Los delimitadores permiten que un script externo capture el bloque.
// -----
void enviarDatosPorUART() {
    if (!SPIFFS.exists("/datos.csv")) {

```

```

    Serial.println("No hay datos guardados");
    return;
}
File file = SPIFFS.open("/datos.csv", FILE_READ);
if (!file) {
    Serial.println("Error abriendo datos.csv");
    return;
}
Serial.println("----INICIO_DATOS----"); // Delimitador de inicio
while (file.available()) {
    String linea = file.readStringUntil('\n');
    if (linea.length() > 0) { Serial.println(linea); }
}
Serial.println("----FIN_DATOS----"); // Delimitador de fin
file.close();
}

// -----
// FUNCIÓN: esperarComandoGET()
// Abre una ventana de tiempo al inicio del boot (default 2 segundos)
// para detectar si un operador quiere descargar datos antes de que
// el ESP32 inicie el ciclo de medición y entre en deep sleep.
// Retorna true si recibió 'GET', false si el tiempo expiró.
// -----
bool esperarComandoGET(unsigned long tiempo_ms=2000) {
    unsigned long start = millis();
    while (millis() - start < tiempo_ms) { // Espera hasta tiempo_ms ms
        while (Serial.available()) {
            String comando = Serial.readStringUntil('\n');
            comando.trim();
            if (comando == "GET") { return true; }
        }
    }
    return false; // Tiempo expirado, continúa con ciclo normal
}

// -----
// FUNCIÓN: setup() - FLUJO PRINCIPAL DE CADA CICLO
// El ESP32 opera en ciclos de deep sleep, por lo que setup() se
// ejecuta completa en cada medición (loop() no se usa normalmente).
// Flujo: inicializar → ¿GET? → WiFi → hora → medir → guardar → enviar →
sleep
// -----
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    analogReadResolution(12); // ADC a 12 bits (0-4095)
    analogSetPinAttenuation(pinNTC, ADC_11db); // Rango 0-3.3 V en el
pin NTC

    if (!SPIFFS.begin(true)) { // Monta la memoria flash
        Serial.println("Error montando SPIFFS");
        return;
    }

    // — Ventana GET —

```

```

// Si en los primeros 2 s llega el comando 'GET' por serial,
// exporta datos y termina sin medir ni entrar en sleep.
if (esperarComandoGET(2000)) {
    enviarDatosPorUART();
    return;
}

// — Conexión WiFi —————
// autoConnect intenta reconectar con la red guardada. Si falla,
// abre un portal cautivo en "Estoma7_Gea" por 60 segundos.
// *** Cambiar el nombre y contraseña del portal si se replica ***
WiFi.mode(WIFI_STA);
wifiManager.setTimeout(60);
bool conectado = wifiManager.autoConnect("Estoma7_Gea", "inn0vacion");

// — Sincronización horaria —————
if (conectado) {
    Serial.println("WiFi conectado");
    sincronizarHora(); // Obtiene hora exacta de NTP
} else {
    Serial.println("Sin WiFi, restaurando hora...");
    restaurarHoraSinInternet(); // Estima la hora sumando 20 min
}

// — Lectura de temperatura —————
// 1. Promedia 10 lecturas del ADC para reducir ruido
// 2. Reconvierte voltaje → valor ADC → resistencia (divisor de voltaje)
// 3. Aplica Steinhart-Hart para obtener temperatura en Kelvin
// 4. Convierte a Celsius y aplica corrección de offset (-5 °C calibrado)
float voltage = getAverageVoltage(pinNTC);
float Vo      = voltage * 4095.0 / 3.3; // Voltaje a valor ADC
R2            = R1 * (4095.0 / Vo - 1.0); // Resistencia del NTC
logR2         = log(R2); // Logaritmo natural
TEMPERATURA   = 1.0 / (c1 + c2*logR2 + c3*pow(logR2, 3)); // Steinhart-
Hart
TEMPERATURA   = TEMPERATURA - 273.15 - 5; // Kelvin → °C +
corrección

// — Registro con marca de tiempo —————
String fecha = rtc.getTime("%Y-%m-%d"); // Ej: 2025-06-10
String hora  = rtc.getTime("%H:%M:%S"); // Ej: 14:30:00

Serial.print("Temperatura: "); Serial.println(TEMPERATURA);
Serial.print("Fecha: ");      Serial.println(fecha);
Serial.print("Hora: ");       Serial.println(hora);

guardarDatoLocal(TEMPERATURA, fecha, hora); // Guarda siempre en flash

// — Envío a Google Sheets (solo si hay WiFi) —————
if (conectado) {
    enviarDatosPendientes(true); // Envía este y todos los pendientes
}

// — Deep Sleep —————
WiFi.disconnect(true);

```

```

WiFi.mode(WIFI_OFF);           // Apaga el radio para ahorrar energía
delay(1000);
if (!Serial.available()) {     // Solo duerme si no hay actividad serial
  Serial.println("Entrando en deep sleep...");
  esp_deep_sleep(intervaloDormir); // Duerme 20 minutos
}
}

// =====
// FUNCIÓN: loop() - MODO INTERACTIVO (solo activo si no hay deep sleep)
// Normalmente el ESP32 no llega aquí porque entra en deep sleep en setup().
// Si se mantiene activo (por actividad serial), atiende dos comandos:
// GET → imprime todos los datos del CSV por el puerto serial
// DEL → borra el archivo /datos.csv de la memoria flash
// =====
void loop() {
  if (Serial.available()) {
    String comando = Serial.readStringUntil('\n');
    comando.trim();
    if (comando == "GET") {
      enviarDatosPorUART();           // Exporta datos por serial
    } else if (comando == "DEL") {
      if (SPIFFS.exists("/datos.csv")) {
        SPIFFS.remove("/datos.csv");
        Serial.println("Datos borrados de memoria flash");
      } else {
        Serial.println("No hay datos para borrar");
      }
    }
  }
}
}

```

Bibliografía y Referencias

- Ackerman, M. B., McRae, M. S., & Longley, W. H. (2009). Microsensor technology to help monitor removable appliance wear. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 135(4), 549–551. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2008.06.021>
- Brierley, C. A., Benson, P. E., & Sandler, J. (2017). How accurate are TheraMon® microsensors at measuring intraoral wear-time? Recorded vs. actual wear times in five volunteers. *Journal of Orthodontics*, 44(4), 241–248. doi:<https://doi.org/10.1080/14653125.2017.1365220>
- de Almeida e Bueno, L., Milnthorpe, W., & Bergmann, J. (2022). Determining the performance of a temperature sensor embedded into a mouthguard. *BDJ Open*, 8(23), 5. doi:<https://doi.org/10.1038/s41405-022-00114-8>
- Eddin Alzoubi, E., Camilleri, S., Al Muzian, M., & Attard, N. (2023). The effect of tooth borne versus skeletally anchored Alt-RAMEC protocol in early treatment of Class III malocclusion: a singlecentre randomized clinical trial. *European Journal of Orthodontics*, 517-527. Obtenido de <https://doi.org/10.1093/ejo/cjad018>
- Manosudprasit, M., Wangsrimongkol, T., Pisek, P., Chowchuen, B., & Somsuk, T. (2012). Growth Modification in Unilateral Cleft Lip and Palate. *Journal of the Medical Association of Thailand*, 95, 42-48. Obtenido de <http://jmat.mat.or.th>
- Nahajowski, M. L. (2022). The use of microsensors to assess the daily wear time of removable orthodontic appliances: A prospective cohort study. *Sensors*, 22(7), 2435. doi:<https://doi.org/10.3390/s22072435>
- Prasad, S., Arunachalam, S., Boillat, T., Ghoneima, A., Gandedkar, N., & Diar-Bakirly, S. (2023). Wearable Orofacial Technology and Orthodontics. *dentistry journal*, 21. doi:<https://doi.org/10.3390/dj11010024>

- Schott, T. C. (2011). Wearing times of orthodontic devices as measured by the TheraMon® microsensor. *Journal of Orofacial Orthopedics*, 72(2), 103-110. doi:<https://doi.org/10.1007/s00056-011-0014-7>
- Schott, T. C., & Göz, G. (2010). Applicative Characteristics of New Microelectronic Sensors Smart Retainer® and TheraMon® for Measuring Wear Time. *Journal of Orofacial Orthopedics*, 71(5), 339-347. doi:<https://doi.org/10.1007/s00056-010-1019-3>
- Stocker, B., Willmann, J. H., Wilmes, B., Vasudavan, S., & Drescher, D. (2016). Wear-time recording during early Class III facemask treatment using TheraMon chip technology. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 150(3), 533–540. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2016.04.016>
- Wafaie, K. S.-B.-B. (2023). Accuracy of thermal microsensors embedded in orthodontic retainers of different material composition and thickness: An in vitro study. *Australasian Orthodontic Journal*, 39(1), 42-48. doi:<https://doi.org/10.2478/aoj-2023-0005>
- Wafaie, K., Rizk, M., Basyouni, M., Daniel, B., & Mohammed, H. (2023). Tele-orthodontics and sensor-based technologies: a systematic review of interventions that monitor and improve compliance of orthodontic patients. *European Journal of Orthodontics*, 450-461.