



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

Estudio y modificación de una cinta de fitness

Research and Modification of a Treadmill

Autor

Pablo Pérez Castro

Director

Javier Esteban Escaño

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia  
2019





**Escuela Universitaria  
Politécnica - La Almunia**  
Centro adscrito  
**Universidad Zaragoza**

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA  
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

**MEMORIA**

Estudio y modificación de una cinta de  
fitness

Research and Modification of a  
Treadmill

**TFG N°: 424.19.32**

Autor: Pablo Pérez Castro

Director: Javier Esteban Escaño

Fecha: Noviembre de 2019

*A quienes lo han hecho posible, gracias.*

# INDICE DE CONTENIDO

<b>1. CAPÍTULO 1</b>	<b>1</b>
1.1. RESUMEN	1
1.1.1. <i>Palabras clave</i>	1
1.2. ABSTRACT	2
1.3. INTRODUCCIÓN	3
1.4. OBJETIVOS	7
1.5. ALCANCE	8
1.6. ANTECEDENTES	10
1.6.1. <i>Peloton Tread</i>	10
1.6.2. <i>Sony Advagym</i>	17
1.6.3. <i>Tonal de Tonal Systems Inc.</i>	22
1.6.4. <i>Peloton Bike</i>	28
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>33</b>
2.1. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA	33
2.1.1. <i>Bluetooth LE (IEEE 802.15.1)</i>	40
2.1.2. <i>ANT y ANT+</i>	45
2.1.3. <i>LoRa - LoRaWAN</i>	46
2.1.4. <i>RFID / NFC (ISO 14443)</i>	51
2.1.5. <i>Wi-Fi (IEEE 802.11)</i>	52
2.1.6. <i>Zigbee (IEEE 802.15.4)</i>	55
2.1.7. <i>6LoWPAN (IEEE 802.15.4)</i>	57
2.2. SISTEMAS OPERATIVOS PARA DISPOSITIVOS MÓVILES Y EMBEBIDOS	62
2.2.1. <i>Sistema operativo Android</i>	62
2.2.2. <i>Sistema operativo iOS</i>	65
2.3. TÉCNICAS DE CONTROL DE MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA DE IMANES PERMANENTES	66
2.3.1. <i>Algoritmos de control</i>	67
2.3.1.1. <i>Ziegler-Nichols</i>	67
2.3.1.2. <i>Optimización por enjambre de partículas (PSO – “Particle Swarm Optimization”)</i>	74
2.3.1. <i>Electrónica de potencia</i>	77
2.4. HERRAMIENTAS DE DESARROLLO DE SOFTWARE	79
2.4.1. <i>Software para el desarrollo de aplicaciones en Android</i>	79

INDICES

2.4.1.1.	Andoid SDK	81
2.4.1.2.	Eclipse	81
2.4.1.3.	inteliJ IDEA	81
2.4.2.	<i>Plataforma Arduino</i>	82
2.4.2.1.	ARDUINO IDE	82
2.4.2.2.	VISUAL STUDIO CODE	84
<b>3.</b>	<b>DESARROLLO</b>	<b>86</b>
3.1.	RESTAURACIÓN	87
3.1.1.	<i>Análisis de requisitos y especificaciones</i>	90
3.1.2.	<i>Análisis funcional</i>	94
3.1.3.	<i>Arquitectura del sistema</i>	96
3.1.3.1.	Apartado mecánico	96
3.1.3.2.	Apartado electrónico	102
3.1.3.2.1.	Placa principal	103
3.1.3.2.2.	Placa auxiliar	108
3.1.3.2.3.	Sensor de frecuencia angular	111
3.1.4.	<i>Implementación</i>	116
3.2.	ACONDICIONAMIENTO PARA CINESIOTERAPIA DE LA MARCHA	136
3.2.1.	<i>Análisis de requisitos y especificaciones</i>	137
3.2.2.	<i>Análisis funcional</i>	140
3.2.3.	<i>Arquitectura del sistema</i>	142
3.2.4.	<i>Implementación</i>	144
3.2.5.	<i>Validación</i>	165
3.3.	MODIFICACIÓN	168
3.3.1.	<i>Análisis de requisitos y especificaciones</i>	169
3.3.2.	<i>Servidor ESP32 BLE</i>	172
3.3.2.1.	Análisis funcional	172
3.3.2.2.	Arquitectura del sistema	174
3.3.3.	<i>Cliente Android</i>	177
3.3.3.1.	Análisis funcional	177
3.3.3.2.	Arquitectura del sistema	178
3.3.4.	<i>Diseño de módulo electrónico</i>	181
3.3.4.1.	Análisis funcional	181
3.3.4.2.	Arquitectura del sistema	183
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>193</b>
<b>5.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>198</b>



## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 - Prueba de esfuerzo en el centro médico de la villa olímpica. Moscú 1980. De RIA Novosti archive, image #555848 / Vitaliy Arutjunov / CC-BY-SA 3.0, CC BY-SA 3.0.....	3
Ilustración 2 - Representación esquemática de los módulos que componen una cinta ergométrica. ....	4
Ilustración 3 - Deportista practicando sobre una cinta ergométrica. De U.S. Navy fotografiado por Mate Airman Shannon E. Renfroe - Esta imagen ha sido realizada por la Armada de Estados Unidos con el número identificador 041110-N-0413R-001. Dominio público. ....	6
Ilustración 4 - Usuario sobre el sistema de ejercicio interactivo de Peloton Inc.	10
Ilustración 5 - Diagrama de diferentes actividades que soporta el sistema de Peloton. ....	11
Ilustración 6 - Representación de los componentes fundamentales, necesarios para crear la experiencia interactiva de usuario. ....	12
Ilustración 7 - Vista explosionada del sistema de ejercicio de Peloton Interactive Inc. ....	13
Ilustración 8 - Arquitectura de control del sistema de ejercicio Peloton Tread ...	15
Ilustración 9 - Principales componentes físicos del sistema Advagym .....	17
Ilustración 10 - Esquema funcional del sistema Sony Advagym, se aprecian tanto los componentes de hardware y software. ....	19
Ilustración 11 - Esquema de la implementación de actuador eléctrico por parte de Tonal Systems .....	23
Ilustración 12 - Curvas de tensión-posición para ejercicios de distinta naturaleza .....	24
Ilustración 13 - Ejemplo de curva de tensión posición con carga asimétrica.....	25
Ilustración 14 - Terminal remoto del sistema de ejercicio de Peloton.....	29
Ilustración 15 - Diagrama del sistema de generación de contenido. ....	30
Ilustración 16 - Diagrama representativo de la comunicación entre los distintos nodos. ....	30



Ilustración 17 - Terminal que muestra la actitud de un usuario.....	31
Ilustración 18 - Ejemplo de interfaz de usuario.....	32
Ilustración 19 - Comparativa de tecnologías complementarias de comunicación inalámbrica (Fuente: STMicroelectronics).....	33
Ilustración 20 - Comparación de diferentes sistemas de comunicación ordenados por tasa de bits y alcance de los enlaces. Ambos ejes están en escala logarítmica. (Fuente: Inside Bluetooth Low Energy, Second Edition).....	37
Ilustración 21 - Logotipo del dispositivo Bluetooth que combina las runas Hagall y Berkana que corresponden a las iniciales de <b>H</b> arald <b>B</b> luetooth.....	41
Ilustración 22 - Topología LoRaWAN, donde los motes pueden pertenecer a cualquiera. (fuente: Wixted et al., 2016). ....	48
Ilustración 23 - Logo representativo de la tecnología NFC (fuente: (WP:NFCC#4), Uso legítimo.) .....	51
Ilustración 24 - Logotipo previo de la "Wi-Fi Alliance". ....	52
Ilustración 25 - Comparación de la pila de protocolos de diversas tecnologías (fuente: Mulligan, 2007).....	59
Ilustración 26 -Comparación de gasto energético adicional en cabeceras 6LoWPAN en paquetes locales y globales (fuente: Mulligan, 2007) .....	61
Ilustración 27 - Ilustración de la sobre oscilación del 25%. fuente: (Ogata, 2003) .....	68
Ilustración 28 - Obtención de la respuesta al escalón unitario del sistema. fuente: (Ogata, 2003) .....	68
Ilustración 29 - Aspecto de la respuesta al escalón unitario de un sistema sin integradores ni polos compuestos conjugados. fuente: (Ogata, 2003) .....	68
Ilustración 30 - Función de transferencia aproximada por un sistema de primer orden.....	69
Ilustración 31 - Regla de sintonización de Ziegler-Nichols fundamentada en la respuesta al escalón unitario de la planta. fuente: (Ogata, 2003) .....	69
Ilustración 32 - Sistema en lazo cerrado con control proporcional. fuente: (Ogata, 2003).....	70
Ilustración 33 - Periodo crítico asociado al parámetro $K_p$ crítico ( $K_{cr}$ ). fuente:(Ogata, 2003).....	70

INDICES

Ilustración 34 - Regla de sintonización de Ziegler-Nichols fundamentada en la ganancia crítica Kcr y el periodo crítico Pcr. fuente: (Ogata, 2003) .....	71
Ilustración 35 - PSO representación gráfica de un procedimiento de optimización por enjambre - By Ephramac - Own work, CC BY-SA 4.0. ....	74
Ilustración 36 - Dominio de aplicación de los diferentes tipos de interruptores estáticos según tensión, corriente y frecuencia de conmutación.....	77
Ilustración 37 - Logotipo Android: "El robot de Android se reproduce o modifica a partir del trabajo generado y compartido por Google, y se usa conforme a lo descrito en la Licencia de Atribución de Creative Commons 3.0". ....	79
Ilustración 38 - Interfaz gráfica de usuario del Arduino IDE en su versión para macOS. ....	82
Ilustración 39 - Interfaz gráfica de usuario de Visual Studio Code. Fuente (WP:N FCC#4), Fair use. ....	84
Ilustración 40 - Método de trabajo en V para el desarrollo de proyectos. ....	86
Ilustración 41 - Cinta ergométrica utilizada para cinesioterapia de la marcha de ADISPAZ. ....	87
Ilustración 42 - Muestra la cinta ergométrica al inicio del estudio.....	90
Ilustración 43 - Diferentes perfiles de consumo de red cuando se introducen capacidades de consumo demorado de la energía en los dispositivos mediante baterías y condensadores (fuente: García-Villalobos et al, 2014). ....	92
Ilustración 44 - Cinta ergométrica en posición plegada, mostrando el muelle neumático. ....	97
Ilustración 45 - Detalle de anclaje del motor y los componentes eléctricos y electrónicos. ....	98
Ilustración 46 - Detalle de la rueda acanalada que transmite la potencia al rodillo, el mecanismo de varillas roscadas y en la parte superior se puede ver el sensor de frecuencia angular. ....	100
Ilustración 47 - Panel de control e información de la cinta ergométrica. ....	101
Ilustración 48 - Detalle de la placa electrónica principal. ....	103
Ilustración 49 - Modulación PWM durante el arranque del motor medido en sus bornes, se observa un efecto inductivo propio del bobinado al principio de los pulsos. ....	105

Ilustración 50 - Cuando se alcanza el régimen estacionario a máxima velocidad el ciclo de trabajo es casi del 100% y la tensión de funcionamiento es aprox. la de pico de la red (en vacío).....	106
Ilustración 51 - Cuando desaparece la señal de potencia de los bornes del motor, en sus bornes aparece una señal continua que desciende lentamente a medida que el motor pierde momento angular y la energía almacenada en el bobinado del motor.	107
Ilustración 52 - Vista posterior de la PCB auxiliar que interactua con el usuario. .....	108
Ilustración 53 - Detalle del ASIC encapsulado en epoxi de la placa auxiliar. ...	110
Ilustración 54 - Detalle de la comunicación entre ambas placas. ....	110
Ilustración 55 - Detalle del punto de montaje del sensor de frecuencia angular en la rueda mayor de la transmisión de la cinta ergométrica. ....	111
Ilustración 56 - Puente realizado para hacer medidas seguras y no invasivas.	113
Ilustración 57 - Señal que genera el sensor de frecuencia angular. ....	113
Ilustración 58 - Displays mostrando información sobre la velocidad, tiempo transcurrido y una estimación de las calorías consumidas por el usuario.....	115
Ilustración 59 - Filtro de emisiones electromagnéticas con su etiqueta correspondiente en la que hay un diagrama de la disposición de sus componentes.	117
Ilustración 60 - Componentes más relevantes señalados sobre la placa principal. .....	117
Ilustración 61 - Etiqueta de servicio del motor eléctrico de corriente continua de imanes permanentes (PMDCM por sus siglas en inglés) que propulsa la banda de rodadura. ....	118
Ilustración 62 - Tensión en bornes del motor en régimen estacionario.....	119
Ilustración 63 - corriente que atraviesa el bobinado del motor, en vacío. ....	119
Ilustración 64 - onda que se observa en el régimen transitorio cuando la cinta está acelerando.....	120
Ilustración 65 - Estado de las escobillas del motor de imanes permanentes que accionan la cinta ergométrica. Se utiliza una moneda como referencia de tamaño. .	121
Ilustración 66 - Vista general del esquema obtenido por ingeniería inversa de la placa principal.....	124

## INDICES

Ilustración 67 - detalle de las protecciones eléctricas incluidas en la entrada de alimentación de la placa principal. ....	125
Ilustración 68 - Transformador de un primario y dos secundarios que alimenta los rectificadores de escasa potencia. ....	125
Ilustración 69 - Fuente de alimentación de 15 V, también indicador de alimentación. ....	126
Ilustración 70 - Convertidor AC/DC de potencia y maniobra de potencia con salida al motor. ....	126
Ilustración 71 - Desaclope óptico de los circuitos. ....	128
Ilustración 72 - E/S del circuito híbrido HIC propietario del fabricante. ....	129
Ilustración 73 - Inspección visual del componente HIC. ....	129
Ilustración 74 - Placa de sustitución, distinta a la original. ....	131
Ilustración 75 - Esquemas técnicos de las operaciones de mecanizado necesarias para que la nueva placa pueda instalarse en la cinta ergométrica. ....	133
Ilustración 76 - Relación de la carga a lo largo del tiempo. fuente: (Zhang, Li, & Wang, 2006).....	140
Ilustración 77 - Corriente de colector $I_{ce}$ en función de la temperatura de la carcasa. fuente: Intersil. ....	142
Ilustración 78 - Interfaz gráfica de usuario de Testo IRsoft. El software utilizado para la interpretación de los datos de termografía infrarroja. ....	144
Ilustración 79 - Representación de los datos de termografía infrarroja correspondientes a caminar durante 5 minutos, con una temperatura máxima en el área de interés de 34,9 °C. ....	145
Ilustración 80 - Datos termográficos capturados tras correr durante 5 min. La temperatura máxima en la zona de interés es de 34,5 °C. ....	145
Ilustración 81 - Extracto de código para la representación gráfica de los datos. ....	146
Ilustración 82 - Histograma de temperaturas en la etapa de potencia. El eje Y representa la temperatura en grados centígrados. ....	146
Ilustración 83 - Comparación de la temperatura máxima medida en la rama de potencia, tras el funcionamiento en vacío durante 30 minutos a diferentes regímenes. ....	152

Ilustración 84 - Histograma de temperaturas en °C en el interruptor estático en carga. ....	157
Ilustración 85 - Versión preliminar del enrutamiento de los componentes de la fuente de alimentación diseñada para el ventilador auxiliar. ....	159
Ilustración 86 - Versión final del diseño y enrutamiento de la PCB para la refrigeración. ....	160
Ilustración 87 - clichés para la fabricación de las PCBs. ....	161
Ilustración 88 - Resultado de la fabricación de la PCB mediante radiación ultravioleta y ataque químico. Se aprecian bandas debido a la edad del material base, aunque es totalmente funcional ya que no hay cortocircuitos ni otras anomalías significativas. ....	162
Ilustración 89 - PCB con los componentes montados y soldados. ....	163
Ilustración 90 - Sistema de refrigeración en su ubicación final. ....	163
Ilustración 91 - Termografía infrarroja de la placa de potencia con la solución de refrigeración instalada, tras un ensayo prolongado en régimen desfavorable. ....	165
Ilustración 92 - Histograma que compara las temperaturas antes y después de aplicar la solución propuesta, comparadas con una medida de control. ....	166
Ilustración 93 - Diagrama de casos de uso de la modificación propuesta. ....	170
Ilustración 94 - Diagrama de actividad correspondiente al servidor BLE. ....	175
Ilustración 95 - Diagrama de actividad de autenticación del usuario por parte del cliente Android. ....	178
Ilustración 96 - Diagrama de actividad de la aplicación cliente Android propuesta. ....	179
Ilustración 97 - Intervención de las señales para conocer su naturaleza. ....	184
Ilustración 98 - Señales que circulan por los pines de la placa original. ....	184
Ilustración 99 - Pines en la placa de reemplazo y sus funciones. ....	185
Ilustración 100 - Diagrama de bloques funcionales de la arquitectura del ESP32. ....	186
Ilustración 101 - Vista general del esquema electrónico del módulo electrónico de adaptación propuesto. ....	187
Ilustración 102 - Circuito propuesto de potencia y filtrado para el módulo adaptador de la cinta ergométrica. ....	188



INDICES

---

Ilustración 103 - Cargador de la pequeña batería embarcada. ....	188
Ilustración 104 - El núcleo del módulo adaptador.....	189
Ilustración 105 - La comunicación ente el PC y el núcleo de la placa se lleva a cabo mediante un conversor entre USB a serie. ....	190
Ilustración 106 - Adaptadores de señal que convierten la señal del microcontrolador a la salida que va a la placa principal.....	191
Ilustración 107 - Conectores de las distintas placas a las que se conecta el módulo adaptador.....	192

# 1. CAPÍTULO 1

## 1.1. RESUMEN

El centro comarcal ocupacional ADISPAZ alza la inquietud acerca de la posibilidad de devolver al servicio una de las cintas ergométricas que utilizan para brindar cinesioterapia de la marcha y otras actividades deportivas.

Se emplea un método de trabajo iterativo para analizar la cuestión y llevar a cabo un desarrollo con diferentes fases en función de los distintos condicionantes que se presentan.

Se observa que el uso de un método objetivo permite la consecución de buenas aproximaciones a objetivos en condiciones variables. El modelo en V proporciona un marco de trabajo que propicia la mejora continua en los resultados, fomentando la iteración de procesos de desarrollo técnico.

También se sientan las bases para futuras líneas de trabajo. Incitando a llevar a cabo actividades posteriores similares, para que así continúe el proceso de estudio científico y desarrollo técnico, en esta y otras materias.

### *1.1.1. Palabras clave*

Cinta ergométrica, análisis, acondicionamiento, Método en V, IoT.



## 1.2. ABSTRACT

Regional occupational therapy centre ADISPAZ raises a concern about sorting out an issue regarding the treadmill used to provide walking (also known as ambulation) kinesiotherapy and other sport activities.

An iterative method is used to analyse the matter and carry out a development with different phases depending on the separate conditioning factors which come forward.

The use of an objective method allows for the attainment of adequate approaches to different targets in variable conditions. The V-Model provides a framework which encourages continuous improvement in the outcome, fostering the iteration of the technical development processes.

Also, foundations for future lines of work are laid. Urging for the fulfilment of subsequent activities with some resemblance to this one. Continuing in this measure the process of scientific study and technical development in this and other subject matters.



## 1.3. INTRODUCCIÓN

Con la mejora de la calidad de vida de las personas, es cada vez más común prestar atención a la propia salud. El equipamiento deportivo se ha convertido en una industria popular. Una representación clara de ello son las cintas de fitness (máquinas motorizadas que permiten caminar o correr largas distancias en espacios interiores relativamente reducidos), que han mejorado notablemente en las décadas recientes.



*Ilustración 1 - Prueba de esfuerzo en el centro médico de la villa olímpica. Moscú 1980. De RIA Novosti archive, image #555848 / Vitaliy Arutjunov / CC-BY-SA 3.0, CC BY-SA 3.0*

La aparición de las cintas motorizadas satisface la necesidad de ejercicio en interiores en cualquier momento, adecuándose al estilo de vida ajetreado que viven muchas personas alrededor del mundo, especialmente en las áreas urbanas, donde el sedentarismo es un problema (Bernstein, Morabia, & Sloutskis, 1999).

Se ha demostrado que este tipo de máquinas tienen impacto positivo en procesos de rehabilitación de personas que han sufrido accidentes o que padecen condiciones físicas crónicas (Lotan, Isakov, Kessel, & Merrick, 2004).

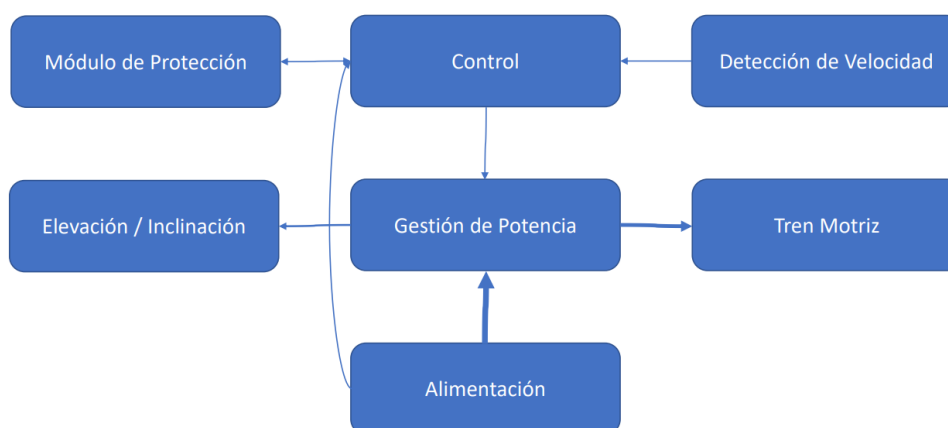
Tras una breve investigación de mercado, se ha identificado que dentro de la gama media-baja predominan el uso de motor DC con escobillas de 1.0 Kw-1.5 Kw, y emplean la modulación de ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés) con tecnología de ataque con onda cuadrada. Se popularizan por su bajo coste.

En la gama alta aparecen con mayor frecuencia motores AC de unos 2.2 Kw y se utiliza control vectorial de conversión de frecuencia. En algunos casos se incluye un motor de elevación de en torno a 75 W que permite variar la pendiente entre 0% y 15%. El alto coste limita el mercado.

En este tipo de máquinas (Zhang, Li, & Wang, 2006) como los pies de una persona tocan alternativamente la cinta, se determina que la carga idealizada es de tipo impulso. Y de hecho la carga es prácticamente una función periódica en el tiempo cuyo valor no cambia mucho.

Un sistema de cinta fitness motorizado consiste principalmente en un módulo de alimentación, un módulo de potencia, un módulo de protección, un módulo de control, un módulo de detección de velocidad y un módulo de elevación.

## Representación Esquemática por Módulos: Cinta Ergométrica

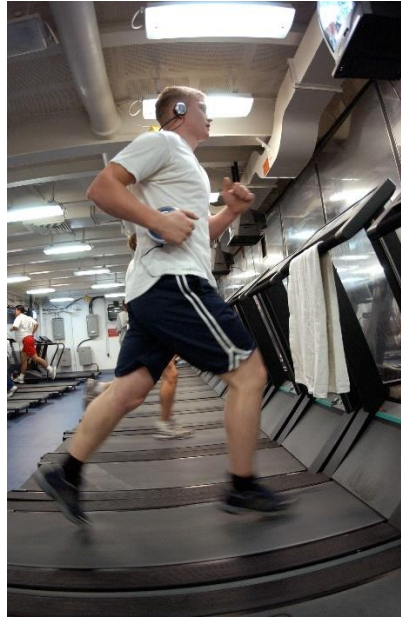


*Ilustración 2 - Representación esquemática de los módulos que componen una cinta ergométrica.*

Se detecta un problema en la comunidad del entorno de la universidad. Existe una asociación de terapia ocupacional para personas con discapacidad. Dicho centro entre otros ofrece terapia de rehabilitación física. Algunas de estos ejercicios se llevan a cabo mediante el uso de una cinta Ergométrica.

Dicha cinta de fitness se encuentra en buen estado general, aunque tiene un fallo de regulación que se manifiesta de manera que es imposible cambiar la velocidad de avance de esta, que además está fijada en un valor muy alto. Esto impide su uso como dispositivo de terapia, ya que en las condiciones de operación establecidas se utiliza a velocidades equivalentes a caminar.

Mientras que el sistema es capaz de establecerse a velocidades mucho mayores (Como las que se observan al correr, por ejemplo). El tutor del Trabajo de Fin de Grado ofrece al autor estudiar el caso procurando en primer lugar devolver el aparato a un estado útil. Posteriormente y estudiando las causas de la avería se analiza si cabe la posibilidad de aumentar la fiabilidad, teniendo en cuenta el régimen tan específico en el que se utiliza la cinta ergométrica en la aplicación de rehabilitación. Se identifican las secciones críticas que dan lugar a los fallos, así como el régimen de mantenimiento que mejora la tasa de averías.



*Ilustración 3 - Deportista practicando sobre una cinta ergométrica. De U.S. Navy fotografiado por Mate Airman Shannon E. Renfro - Esta imagen ha sido realizada por la Armada de Estados Unidos con el número identificador 041110-N-0413R-001. Dominio público.*

Para llevar a cabo esta tarea se realiza un estudio del sistema para identificar el estado de la máquina. Incluyendo las tecnologías que sustentan su funcionamiento, los efectos de la avería y sus causas. A partir de la información recabada se toman decisiones informadas para mejorar el estado de la máquina, así como disminuir la probabilidad de que se produzca un fallo similar en un futuro próximo, y adaptar las capacidades al caso de uso en cinesioterapia y a la ubicuidad de la informática de bolsillo.

## 1.4. OBJETIVOS

A partir de un sistema de cinta ergométrica se plantea:

1. Estudiar su posible restauración a un estado funcional. A medida que se indaga en la cuestión, podrían:
2. Esclarecerse los procesos que causarían las averías observadas.
3. Dichos procesos destructivos tal vez pudieran ser minimizados, dado el avance de la técnica desde el diseño y fabricación del producto. Además, continuando en esta línea, la cinta ergométrica se emplea en un caso de uso relacionado con la cinesioterapia de la marcha, que, debido a sus diferencias con la concepción original como máquina de ejercicio aeróbico, llevaría a que los componentes sufran esfuerzos anómalos que podrían provocar el desgaste prematuro o acelerado de los mismos. Una vez completadas las fases de puesta en funcionamiento y adaptación al caso de uso de la instalación final, sería el momento de
4. Renovar las capacidades del dispositivo, actualizando la interacción con el usuario acorde a la revolución tecnológica de los últimos años.
5. Innovar, introduciendo capacidades al dispositivo acordes a las posibilidades de la técnica actual.

## 1.5. ALCANCE

Se parte de una máquina para cinesioterapia, incapaz de cumplir su función debido a la nula autoridad que se tiene sobre el actuador de la cinta ergométrica. El plan de actuación consiste en estudiar en detalle los principios y tecnologías principales que permiten el funcionamiento del dispositivo.

A continuación, se intenta detectar las causas de la avería. Gracias al conocimiento adquirido. Llegando a una conclusión sobre el proceso que produce el fallo.

Después se estudia la viabilidad de diseñar una solución, para reducir el número de averías producidas por el mismo motivo. Se fabrica un prototipo, y se estudia el impacto de dicha solución sobre los procesos destructivos presentes. Evaluando si se consigue el efecto deseado.

Por último, se analiza la posibilidad de incorporar capacidades a la máquina gracias a tecnologías que han experimentado grandes avances en los últimos años, y por tanto desde que se llevó a cabo el diseño original de la cinta ergométrica.

Dichos avances considerables permiten integrar interesantes capacidades, adaptadas al ecosistema tecnológico actual, de forma barata y relativamente sencilla. Es posible que el esfuerzo intenso de un pequeño grupo de personas o incluso de un individuo, sea suficiente impactar profundamente la experiencia que tiene el usuario con el dispositivo.

Tanto en el entrenamiento deportivo como en la rehabilitación médica es importante la adherencia al procedimiento (Pérez, Payá, Fernández, Sánchez, & Alonso, 2012). Por muy detallada y correcta que sea la planificación de los ejercicios, si no se ejecutan con regularidad el progreso que se obtiene puede ser menor, es decir, no es eficaz y la eficiencia de los recursos empleados es baja.

Esto además impacta negativamente en la motivación intrínseca del deportista actuando como una realimentación negativa que aleja a la persona de la actividad



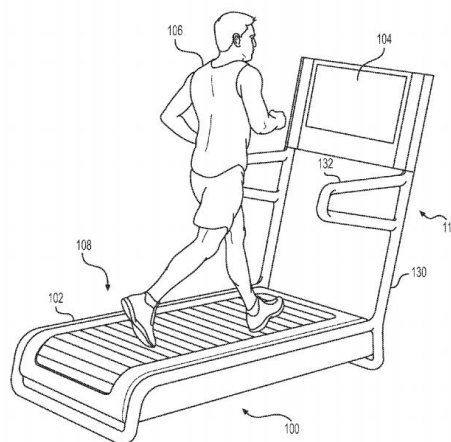
beneficiosa. Lo importante es que la actividad sea atractiva para facilitar que el usuario mantenga su compromiso con la actividad física y obtenga los beneficios para la salud y bienestar que tiene el potencial de recibir.

## 1.6. ANTECEDENTES

En el presente capítulo se lleva a cabo una revisión bibliográfica del estado de la cuestión, enfocada en los años más recientes. Se obtiene de esta manera una panorámica actualizada del lugar que ocupa la discusión en la sociedad. Debido al ámbito de carácter ingenieril en el que se enmarca el presente trabajo, se hace énfasis en los aspectos más técnicos y tecnológicos. Asimismo, cuando sea oportuno se extenderá el alcance a aquellos asuntos que sean relevantes o aporten claridad a las ideas centrales que guían el desarrollo de la esta labor.

### 1.6.1. Peloton Tread

En el año 2018 la empresa Peloton Interactive Inc. Patentó un sistema y método de ejercicio que consiste en la utilización de una máquina de ejercicio que incluye un procesador, una pantalla, una cubierta y una cinta rodante. La máquina también incluye un sensor conectado al procesador configurado para detectar un parámetro de rendimiento asociado con la máquina de ejercicio. Además, en dicha implementación concreta el parámetro de rendimiento puede ser ignorado si se detecta que el usuario no se encuentra sobre la cinta (United States Patent N.º US20180126248A1, 2018).

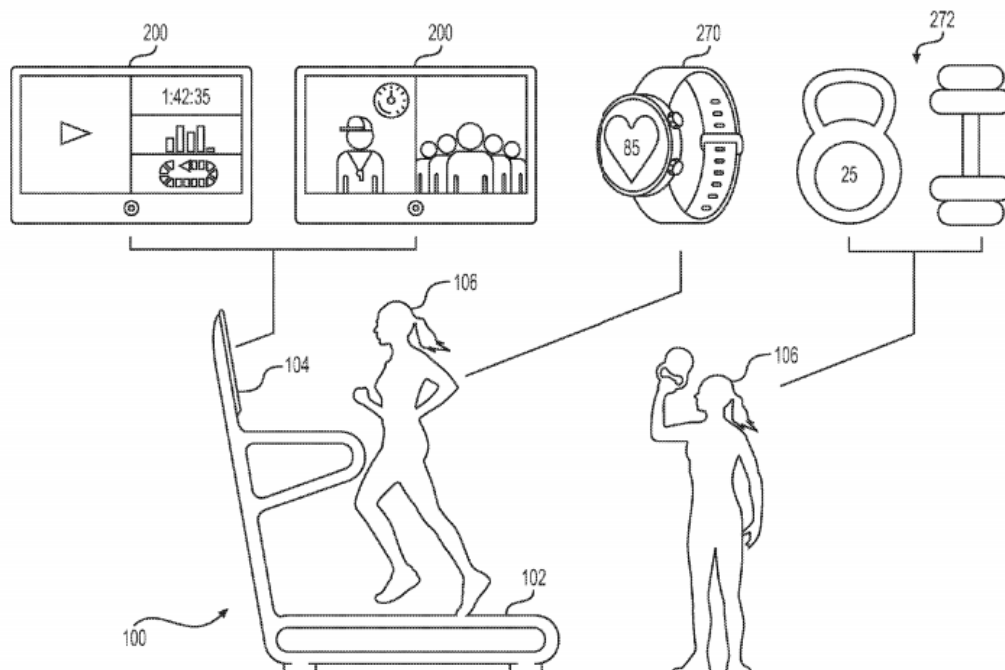


**FIG. 1**

*Ilustración 4 – Usuario sobre el sistema de ejercicio interactivo de Peloton Inc.*



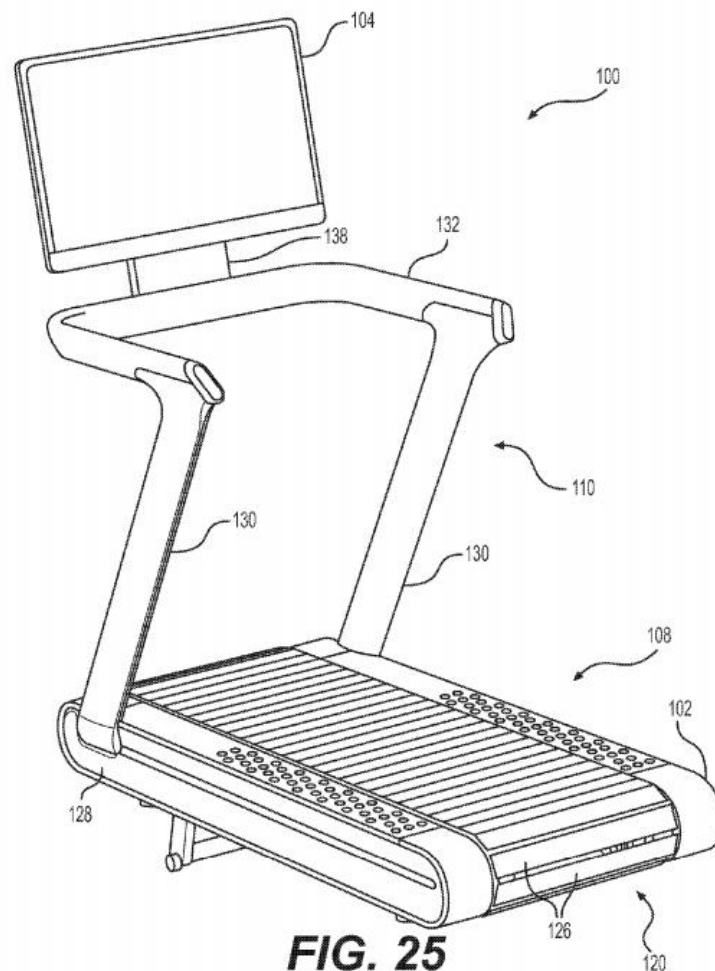
El sistema se caracteriza por la integración con el ecosistema tecnológico actual, de tal manera que el usuario puede seguir las clases de fitness desde el punto de instalación de la máquina, que puede ser su domicilio. El sistema se integra con el concepto de salud móvil (*mHealth*) en el que se hace uso de la tecnología móvil para la gestión de la salud de las personas. Además, cabe destacar la integración con la tecnología vestible (*Wearables*) que son dispositivos electrónicos inteligentes, incorporados en la vestimenta y que son usados corporalmente como implantes o accesorios. Estos actúan como extensión del cuerpo o la mente del usuario, permitiendo obtener parámetros clave relacionados con el método de ejercicio, que permiten ajustar dicho método a las necesidades del usuario. En la siguiente figura se ven varios de estos conceptos, incluyendo el hecho de que la integración con el ecosistema tecnológico permite el seguimiento de más tipos de ejercicios que los que permite la máquina a priori.



**FIG. 5**

*Ilustración 5 – Diagrama de diferentes actividades que soporta el sistema de Peloton.*

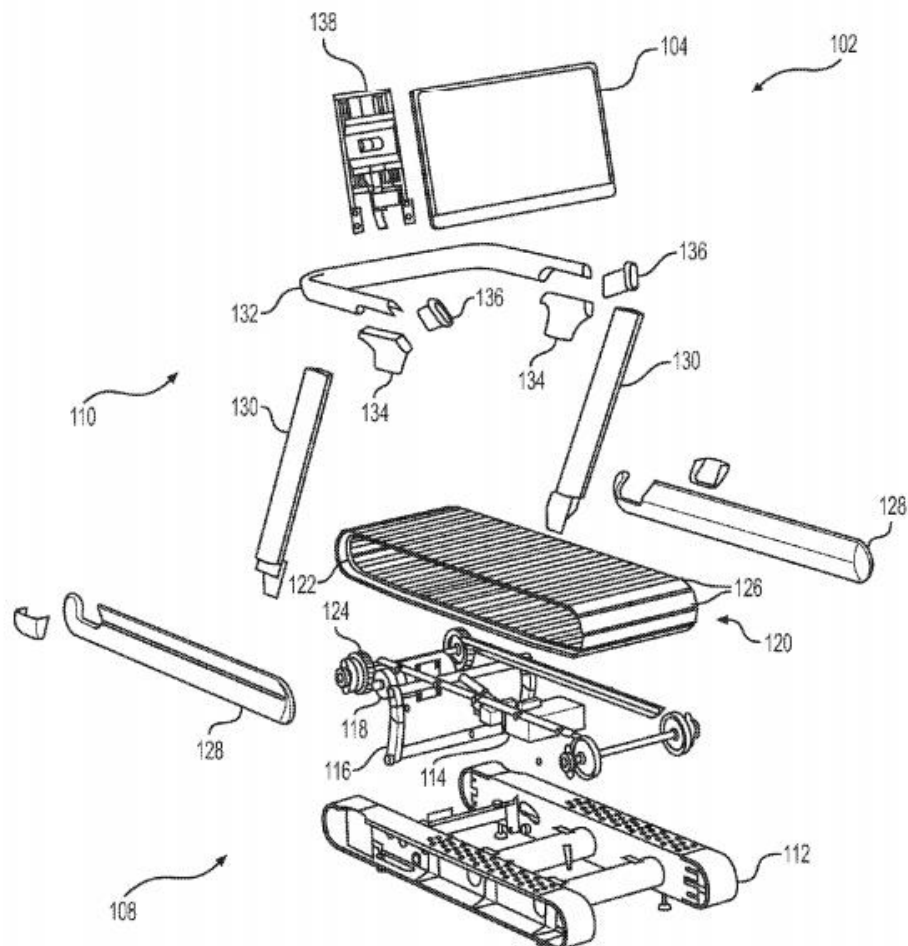
El sistema se fundamenta en la competitividad inherente de los seres humanos, que buscan mejorar su rendimiento tanto comparándose con sus propios esfuerzos previos, como con otros. Además, las personas también se sienten atraídas hacia los juegos y otras diversiones, de tal manera que incluso en tareas que la persona puede considerar difíciles y molestas, pueden convertirse en atractivas si se introducen varios elementos lúdicos. El equipamiento y métodos existentes de ejercicio que hay instalados en muchos hogares y gimnasios, está ausente de estas características clave que permiten a los participantes competir entre ellos, conversar entre ellos y hacer lúdicas las actividades de ejercicio (United States Patent N.º US20180126248A1, 2018).



*Ilustración 6 – Representación de los componentes fundamentales, necesarios para crear la experiencia interactiva de usuario.*

Incluso cuando existe equipamiento de ejercicio que incorpora entretenimiento como pantallas de video que presentan contenido o datos del rendimiento del usuario mientras se ejercita, estos carecen de la capacidad de atraer de verdad al usuario en un escenario competitivo o de juego que mejora tanto la experiencia del usuario como su rendimiento. Estos sistemas también carecen de la posibilidad de facilitar el acto de compartir información en tiempo real, la conversación, datos y otro contenido entre usuarios así como con un instructor y uno o varios usuarios (United States Patent N.º US20180126248A1, 2018).

En la siguiente vista podemos ver los componentes del sistema en mejor detalle.



**FIG. 26**

*Ilustración 7 - Vista explosionada del sistema de ejercicio de Peloton Interactive Inc.*

Para mejorar la experiencia y promover un entorno más atractivo, los gimnasios ofrecen clases de ejercicios como por ejemplo yoga, aerobio y otras clases en las que un instructor conduce a los participantes en una variedad de ejercicios. Sin embargo, estas son solo accesibles en ciertas horas y lugares. De tal manera que acaban resultando inaccesibles para muchos usuarios potenciales, siendo además generalmente muy caras e incluso llenándose el cupo por completo de tal manera que incluso usuarios con una ubicación conveniente y disponibilidad horaria no pueden reservar una clase. Esto motiva a Peloton Interactive a crear diferentes encarnaciones de la presente revelación con el fin de darle solución a estos problemas. Como por ejemplo en esta cinta ergométrica que incorpora entradas y salidas multimedia para la transmisión en directo o la reproducción del contenido instructivo, con integración de las redes sociales, así como capacidades de video conferencia y llamadas de voz. También incorpora un aspecto social en las estadísticas de rendimiento y capacidades competitivas junto con una serie de características lúdicas (United States Patent N.º US20180126248A1, 2018).

Cabe destacar que muchas de estas capacidades se pueden obtener de forma económica con una reforma relativamente sencilla del equipamiento existente, y una aplicación para un dispositivo inteligente que el usuario posiblemente ya posea.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de arquitectura de control que se utiliza en la máquina Peloton Tread.

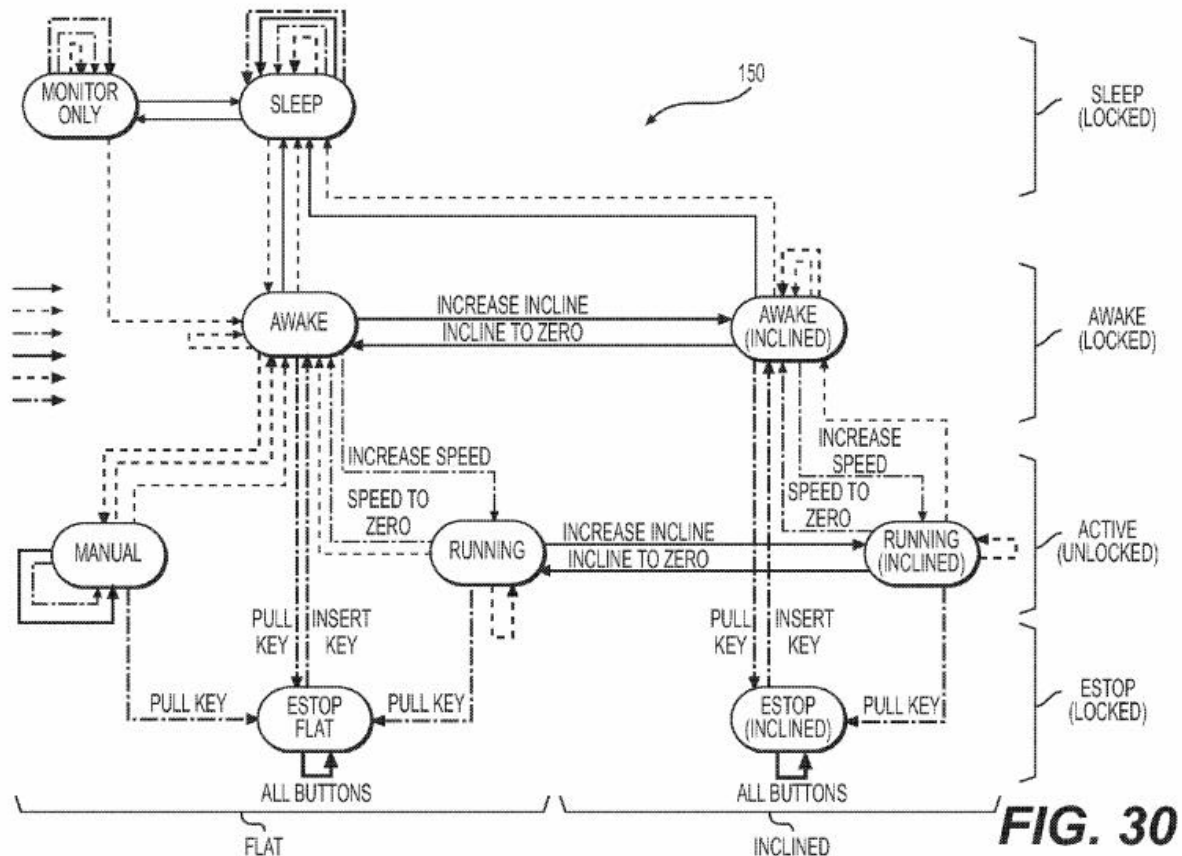


Ilustración 8 - Arquitectura de control del sistema de ejercicio Peloton Tread

Como se ve en el diagrama la máquina puede estar en diversos estados, y en cada uno de ellos se pueden modificar diferentes parámetros en función de los que requiera la actividad, incluyendo la parada de emergencia.

La siguiente tabla muestra las principales características técnicas del sistema Peloton Tread:

Magnitudes	Valores
<b>Peso</b>	206,4 kg
<b>Dimensiones de la cinta</b>	609,6 mm (A) x 1219,2 mm (L)
<b>Potencia de accionamiento</b>	1500 W AC
<b>Velocidad máxima</b>	$5,59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (20 km/h)
<b>Observaciones</b>	Plataforma en acero dulce, pretiles en el mismo material con detalles en fundición de aluminio con revestimiento de tacto suave. Bandeja con 2 posavasos en policarbonato y acentos en material textil de Nylon. Banda de rodadura con 59 lamas de aluminio sobre moldeadas en elastómero, sobre rail con rodamientos de bolas.

### 1.6.2. Sony Advagym

Se trata de una solución para modernizar la infraestructura de un gimnasio convencional y adaptarlo a las necesidades y capacidades propias de la tecnología actual. Entre otros aspectos, la empresa destaca la capacidad de atraer y retener a los usuarios en planes de ejercicio más beneficiosos para las necesidades más individualizadas de cada uno de los usuarios. Además, es capaz de hacer un seguimiento de la realización de los ejercicios de tal forma que se ejecuten de manera correcta y sobre todo con la frecuencia, intervalos y repeticiones óptimas. Esto incrementa la tasa de progreso de los usuarios, lo que según afirma el fabricante provoca que los usuarios queden más satisfechos con su experiencia en el gimnasio.



*Ilustración 9 - Principales componentes físicos del sistema Advagym*

Los usuarios pueden crear planes de ejercicio personalizados, guardar y hacer un seguimiento de sus datos y progresos, y consultar sus resultados en cualquier momento en la APP. Además, el gimnasio puede proponer planes de entrenamiento tanto de ejercicios de peso libre como de entrenamiento con máquinas. Los entrenadores personales pueden interactuar con los usuarios del gimnasio para aconsejarles y animarlos en su progreso.

El sistema permite la digitalización de un gimnasio sin la necesidad de reemplazar el equipamiento, transformando un gimnasio tradicional en unas instalaciones modernas y conectadas de la noche a la mañana. El hardware puede ser instalado en todas las primeras marcas de equipamiento deportivo y el sistema integra todo incluyendo el hardware, bases de datos, almacenamiento en la nube y aplicaciones tanto para Android



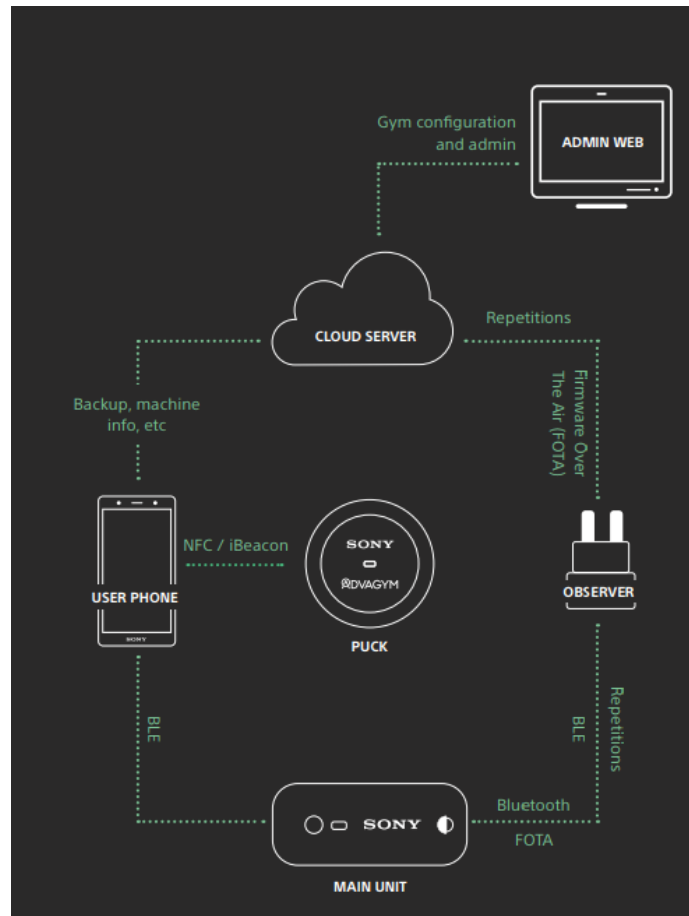
como iOS. De tal manera que en cuestión de horas se puede instalar el sistema y está listo para funcionar.

La aplicación de Advagym ayuda a motivar e inspirar a los usuarios del gimnasio haciendo del lápiz y papel una cosa del pasado. Con tan solo contactar el móvil con el sensor en una máquina conectada para llevar la cuenta de repeticiones y conjuntos de ejercicios de forma automática y en tiempo real. De tal manera que permite la inspiración de una sesión de ejercicio en base a las estadísticas del propio usuario, de otros usuarios, del entrenador personal o globales del propio gimnasio.

Los gimnasios pueden ofrecer planes de ejercicios personalizados con instrucciones escritas o en video que se pueden compartir con los clientes. De tal manera que es posible ofrecer programas personalizados y retroalimentación sobre su progreso.

Se trata de una solución completa desde el punto tanto de software como de hardware. Que además no impacta de manera significativa el flujo de trabajo de los empleados, a la vez que si que crea una experiencia más agradable y completa para los usuarios.





*Ilustración 10 - Esquema funcional del sistema Sony Advagym, se aprecian tanto los componentes de hardware y software.*

La aplicación tiene una interfaz de usuario amigable que ayuda a los usuarios a monitorizar su ejercicio y progreso en tiempo real, la manera de interactuar entre la máquina y el teléfono se ha simplificado en gran medida gracias a las tecnologías de comunicación de campo cercano (NFC por sus siglas en inglés). Así basta con tocar la pastilla que se encuentra en la máquina para iniciar sesión y comenzar el seguimiento del ejercicio. Hace que el uso del sistema sea menos invasivo para el usuario y que los beneficios superen los pasos adicionales incorporados.

El historial completo de ejercicio del usuario queda a disposición del entrenador personal para que este pueda tomar decisiones informadas y recomendar programas de forma individualizada. También se guardan los ajustes y preferencias de la máquina asociados al usuario.

Este sistema permite el uso de los ajustes originales de los aparatos de tal manera que no es necesario hacer una reforma muy grande de los aparatos. El sistema cuenta con temporizadores de descanso de tal manera que integra la información de una sesión de ejercicio. También se puede añadir ejercicios de forma manual en el caso de que sea necesario. El usuario puede añadir sus propios ejercicios y guardar sus programas de ejercicio favoritos.

En el apartado de ludificación existe un sistema de recompensas y logros en función de lo que consiga el usuario como por ejemplo entrenar tres días a la semana o haber levantado 50 toneladas en total.

En el apartado de hardware el sistema de Advagym contiene los siguientes elementos, en primer lugar, está el sistema de identificación de usuarios que tiene forma de disco y son pequeños sensores ubicados en las máquinas de ejercicio. Los usuarios inician la sesión en la máquina tocando con sus dispositivos móviles en el sensor utilizando NFC en el caso de Android y Bluetooth en el caso de iOS. Dichos sensores funcionan con pilas y su autonomía es de unos 4 años durante la operación normal de un gimnasio. Además, las pilas son sencillas de reemplazar.

Existe un modelo de estos sensores que está pensado para poner en zonas de peso libre en lugar de en las máquinas de ejercicio, después el usuario puede elegir ejercicios propuestos o crear los suyos propios.

También hay una unidad principal que es el núcleo del sistema, se monta encima de los montones de peso de tal manera que mide el número de repeticiones y grupos de ejercicios, así como la velocidad y el abanico de movimientos. En este caso la autonomía de la pila es de 2 años y es la unidad que se comunica con el observador para transferir los datos del ejercicio.

El observador es una unidad Wi-Fi que se enchufa en las tomas de tensión de la pared, recibe las señales de las unidades principales y envía los datos a la base de datos

en la nube. El número de observadores requeridos depende del tamaño y la configuración de las instalaciones del gimnasio.

El sistema se completa con una interfaz web que muestra datos, desde la utilización de las máquinas al estado del sistema. Es capaz de mostrar los datos de uso de los usuarios que no utilizan el sistema Advagym también. Permite identificar patrones de entrenamiento, así como ver y gestionar todos los programas y ejercicios, así como crear informes de parámetros relevantes como los perfiles de usuario y la popularidad de una determinada máquina.

Existe una aplicación de instalación que guía paso a paso en la instalación y configuración individual de cada máquina y del sistema completo.

Como complementos existen soportes donde el usuario puede dejar su teléfono mientras realiza el ejercicio, así como un sensor de recepción que configura la aplicación para el gimnasio específico con sus máquinas y ejercicios específicos.

Además, existe material promocional para fomentar la adopción del sistema que incluye formatos tradicionales y material audiovisual, y contenido para las redes sociales.

Las aspiraciones de este sistema son las de crear una experiencia de gimnasio conectado que convierta un gimnasio clásico en una instalación moderna y conectada con un esfuerzo de instalación bajo. De esta manera pretende aumentar la lealtad de los usuarios y les permite llevar un seguimiento de sus sesiones de ejercicio en tiempo real y ver su progreso a lo largo del tiempo. Además, obteniendo información relevante del uso de las máquinas y la capacidad de interactuar más con los usuarios.

### *1.6.3. Tonal de Tonal Systems Inc.*

Para el entrenamiento de fuerza se debe provocar una resistencia en los músculos para estimular su crecimiento. Este tipo de oposición se puede llevar a cabo mediante elementos cuya masa es conocida y dispuestos de tal manera que el gesto deportivo resulte ergonómico. Es posible sustituir el elemento resistivo por otros de tipo elástico o fluidomecánica ya sean líquidos o gases estrangulados (United States Patent N.º US20180021616A1, 2018; Pérez et al., 2012). Sin embargo, estas cargas responden a las respectivas leyes de la física que las gobiernan, es decir se tiene poco control sobre su aplicación sobre la musculatura. Las curvas de resistencia que generan no son las óptimas para el desarrollo del músculo y pueden resultar peligrosas en ciertos casos sobre todo en el entorno del límite de rendimiento del atleta.

El sistema de Tonal ofrece resistencia al usuario por medio de un actuador eléctrico cuyas curvas de respuesta son programables a través de un diseño de electrónica de potencia. En el desarrollo de Tonal la empuñadura está acoplada a través de un cable a un motor parcialmente controlado por un filtro. Este último está controlado por una unidad de cómputo digital que ajusta dinámicamente el par del motor para hacer el ejercicio físico más eficiente, efectivo, seguro y agradable para el usuario (United States Patent N.º US20180021616A1, 2018).

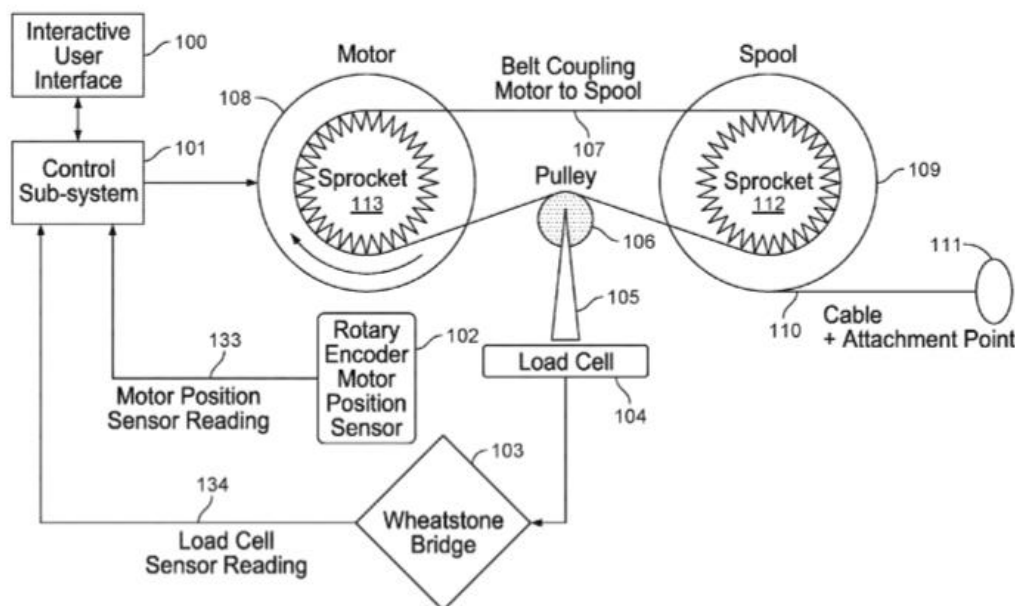


FIG. 22

Ilustración 11 - Esquema de la implementación de actuador eléctrico por parte de Tonal Systems

El entrenamiento de fuerza produce un beneficio en el usuario que depende de en gran medida de la ejecución del ejercicio incluyendo la ejecución del gesto deportivo, la trayectoria seguida, la intensidad del ejercicio en relación con la resistencia que opone el sistema de entrenamiento, así como el *tempo* o vigor con el que se realiza el ejercicio, el número de repeticiones y conjuntos de ejercicios que se realizan, o el tiempo de recuperación entre otros. Además, el máximo beneficio que es capaz de dar este ejercicio proviene de la insistencia en dicho gesto hasta o incluso sobrepasando el fallo, punto en el que no es posible vencer la resistencia de nuevo y se debe reposar el músculo para permitir que se recupere y reconstruya más fuerte.

Existen técnicas adicionales para fortalecer al usuario aún más. Los más importantes son el entrenamiento concéntrico, excéntrico e isométrico. Los movimientos concéntricos son en los que los músculos se contraen en carga, como por ejemplo en el uso de del bíceps para iniciar el levantamiento de un peso. El entrenamiento isométrico se produce cuando el músculo se mantiene estable o en la misma posición en carga, por

ejemplo, cuando el bíceps ha levantado una masa y la mantiene levantada en una posición. Por último, el entrenamiento excéntrico se produce al extender un músculo en carga, por ejemplo, al resistir con el bíceps el efecto de la gravedad al bajar una masa levantada previamente.

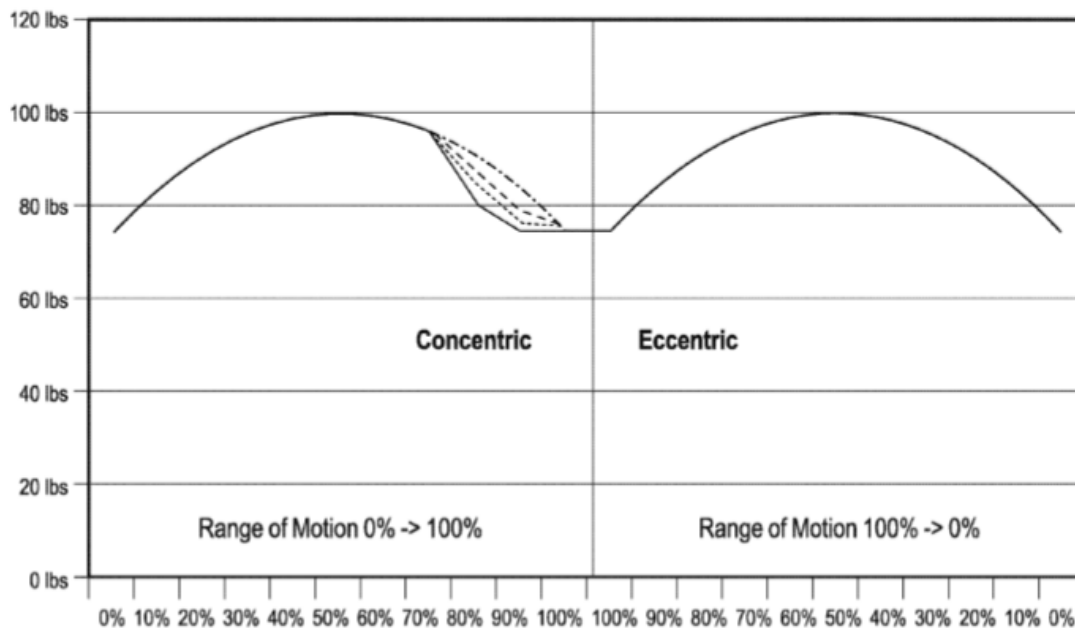


FIG. 16

*Ilustración 12 - Curvas de tensión-posición para ejercicios de distinta naturaleza*

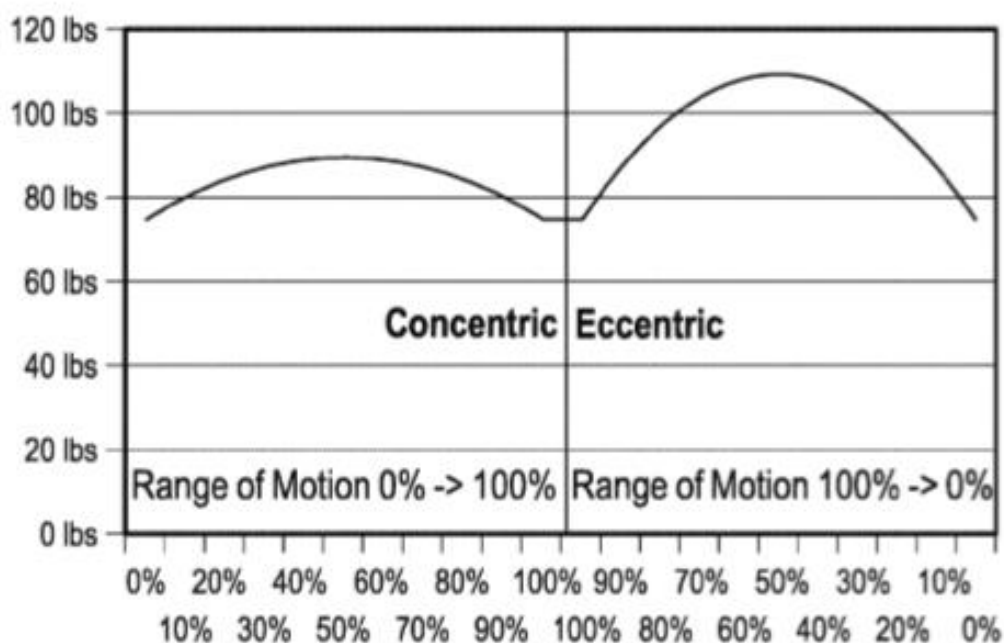
De forma colectiva los factores que componen el gesto, la intensidad, el tempo, el número de repeticiones y conjuntos de ejercicios, el ritmo, entrenamiento concéntrico isométrico y excéntrico se denominan "protocolos de entrenamiento". Tradicionalmente la mayoría de entrenamiento de resistencia involucra cargas concéntricas y excéntricas simétricas, de tal manera que la misma masa se usa en las dos direcciones. Por ejemplo, el usuario levanta una masa y luego resiste la gravedad mientras baja el mismo peso.

Existen protocolos de ejercicio que cuentan con movimientos asimétricos, incluyendo aquellos puramente concéntricos o excéntricos y los combinados asimétricos concéntrico-excéntricos. El término "carga concéntrica" se utiliza cuando la fase concéntrica tiene más masa aplicada que la fase excéntrica. El término "carga excéntrica" se utiliza en el caso contrario. Estos protocolos y múltiples variaciones, como

por ejemplo mezclas de ejercicios concéntricos-isométricos- excéntricos, así como movimientos pliométricos explosivos son conocidos por atletas expertos.

Los usuarios emplean el entrenamiento de fuerza no solo para fortalecer sus músculos, sino también el tejido conectivo como son los tendones que rodean el músculo. Se ha podido demostrar que las cargas excéntricas producen un fortalecimiento más eficaz del tendón, especialmente en presencia de tendinopatía (United States Patent N.º US20180021616A1, 2018).

En la práctica conseguir protocolos asimétricos es complejo. Por ejemplo, una mancuerna con masa no puede cambiar el valor de ésta espontáneamente, ya que incumpliría las leyes físicas. Por tanto, resulta complicado obtener protocolos de carga excéntrica en la que la carga es mayor en la fase excéntrica que en la fase concéntrica.



*Ilustración 13 - Ejemplo de curva de tensión posición con carga asimétrica*

Existen algunas soluciones improvisadas, como el uso de bandas elásticas, escalones de *fitness* o un segundo usuario para habilitar la asimetría. Pero además el usuario debe mantener un gesto correcto y un ritmo adecuado para cosechar resultados adecuados que aprovechen las virtudes del entrenamiento por protocolos asimétricos, lo que es difícil con las soluciones improvisadas.

Por otra parte, cada persona difiere del resto en el punto de longitud del músculo óptima en la que alcanza la tensión máxima, es decir donde es más fuerte. Y además este punto varía a medida que el usuario se fatiga mientras progresa la sesión de ejercicio. Por lo tanto, hacer que un usuario mueva un peso a lo largo de todo el recorrido del músculo es mejorable teniendo en cuenta que la capacidad del músculo de soportar tensión varía a lo largo de su rango de movimiento. Variando además entre ejercicios concéntricos, isométricos y excéntricos.

Tradicionalmente el entrenamiento de fuerza se realizaba con alguna de las siguientes categorías de métodos/aparatos:

**Peso corporal:** Cuando no se utiliza nada a parte de la fuerza que ejerce la gravedad sobre la masa del cuerpo para obtener una resistencia que permita entrenar. Las dominadas son un buen ejemplo de esto. Algunos sistemas como el TRX ofrecen accesorios que pueden ayudar a conseguir mejor este tipo de entrenamiento.

**Masas libres:** Un ejemplo clásico son las mancuernas que también actúan utilizando la gravedad para producir una fuerza, el peso. La tensión que experimenta el usuario a lo largo de la ejecución del gesto varía dependiendo del ángulo con el que se realiza el movimiento y la dirección relativa de la gravedad. Para algunos movimientos como la flexión de bíceps la curva de tensión aplicada es particularmente variable, comienza en prácticamente cero cuando el brazo está completamente extendido y alcanza su máximo cuando la flexión es de 90°, reduciéndose de nuevo cuando el brazo alcanza la flexión completa hasta prácticamente alcanzar el cero de nuevo.

**Máquinas con raíles fijos:** Son máquinas que utilizan masas fijas, por ejemplo, planchas de metal que forman una pila de pesas, acoplada mediante un cable a una leva que a su vez se une a un mecanismo que funciona sobre un pivote o raíles. A menudo estas máquinas tienen una curva de tensión aplicada fija. Aunque también existen sistemas que tienen levas con formas especiales para obtener efectos no lineales sobre la curva de tensión aplicada. Normalmente la masa es seleccionada mediante un perno que se inserta asociado a una pila de pesas determinada que se desee.



Máquinas cableadas: Son un híbrido entre las máquinas de masas libres y las de raíles fijos. Están compuestas por una pila de masas unidas a un cable, a través de un sistema de poleas que puede ser ajustada en altura o dirección. Las máquinas de raíles fijos han sido criticadas históricamente por el sobre aislamiento de determinados grupos musculares. En cambio, las masas libres han sido criticadas por la activación de muchos músculos pequeños de estabilización, lo que significa que el entrenamiento del usuario puede verse limitado antes por estos pequeños músculos antes de que los grandes si quiera haya obtenido un buen entrenamiento. Los cables no utilizan raíles, y por lo tanto requieren algunos músculos de estabilización, sin embargo, no tantos como con las masas libres porque la dirección de tracción es estrictamente la del cable. La curva de tensión efectiva aplicada varía si el ángulo de ataque del punto de contacto con el cuerpo cambia a lo largo del desarrollo del gesto.

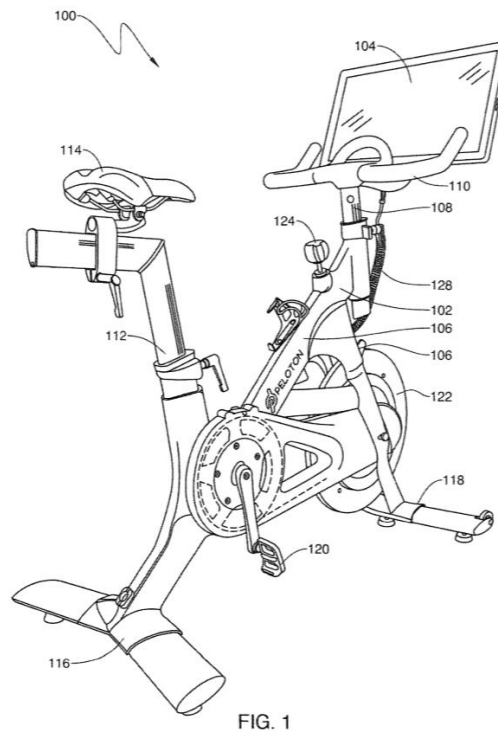
Siendo la gravedad la principal fuente de tensión en los casos anteriores, también se ha conseguido el efecto utilizando muelles, la flexión de barras de nylon, elásticos compuestos de tiras de elastómeros, así como neumática e hidráulica. Estos sistemas tienen varias características con sus propias curvas de tensión aplicada.

En cuanto a la resistencia electrónica, se utiliza un campo electromagnético para generar la resistencia al usuario, en una de las implementaciones se utiliza un motor *brushless* de tres fases de corriente continua (BLDC p.s.s. en inglés) para crear la resistencia. También es posible utilizar un motor de inducción (motor asíncrono) de corriente alterna para el mismo propósito. El uso de una resistencia electrónica tiene la ventaja de que el dispositivo de entrenamiento puede tener dimensiones más reducidas y ser más ligero que los aparatos tradicionales con una pila de pesas. Además, es muy versátil si se utiliza un sistema de control electrónico, e incluso digital, que permite el uso de software para controlar y dirigir la tensión.

### 1.6.4. Peloton Bike

Dispositivo de retransmisión y seguimiento de clases deportivas bajo demanda. Fundamentado en los principios de competitividad y esfuerzo por la mejora de los seres humanos, así como la afinidad por las actividades lúdicas. Dichas características diferenciadoras provocan que una actividad que podría resultar tediosa se vuelva atractiva de tal manera que el usuario tolere e incluso disfrute más de la actividad a corto plazo, con la introducción de elementos lúdicos. El equipamiento que existe habitualmente en los hogares carece de la capacidad de permitir la competitividad en tiempo real, así como la introducción de elementos lúdicos. Ambas características son favorecedores de una mejor experiencia y rendimiento por parte del usuario.

La invención lleva la experiencia de las clases del gimnasio al hogar, lo que permite el seguimiento de las clases que resulte conveniente, además de permitir un número potencialmente ilimitado de usuarios. El dispositivo cuenta con una bicicleta estática, así como entradas y salidas multimedia para la retransmisión en directo de las clases de *spinning*. Es posible mostrar clases tanto en directo como archivadas. Cuando el usuario se identifica en el sistema, este puede mostrar diversos parámetros y ajustar el dispositivo a las preferencias del usuario concreto.



*Ilustración 14 - Terminal remoto del sistema de ejercicio de Peloton.*

En líneas generales se trata de una bicicleta estática con un sistema local que permite al usuario participar en clases retransmitidas en directo por un instructor, así como acceder a una biblioteca de clases pregrabadas desde cualquier ubicación con una red adecuada.

El sistema incluye una infraestructura de servidores, sistemas de almacenamiento y otros dispositivos, así como *software* que permite gestionar las tareas de procesamiento, comunicación, base de datos y el resto de las funciones requeridas para el funcionamiento.

También se utilizan estudios y lugares de grabación en los que se genera el contenido mediante el uso de cámaras y micrófonos. De tal manera que un instructor pueda dar una clase o grabar contenido, o incluso llevar una clase presencial. Es posible permitir la interacción en ambas direcciones tanto desde ubicaciones remotas como en la misma localización. Así los instructores pueden solicitar la realimentación de los usuarios y estos pueden dársela. También es posible que los usuarios interactúen entre ellos, así como votar diferentes opciones y comunicarse en relación con su experiencia.

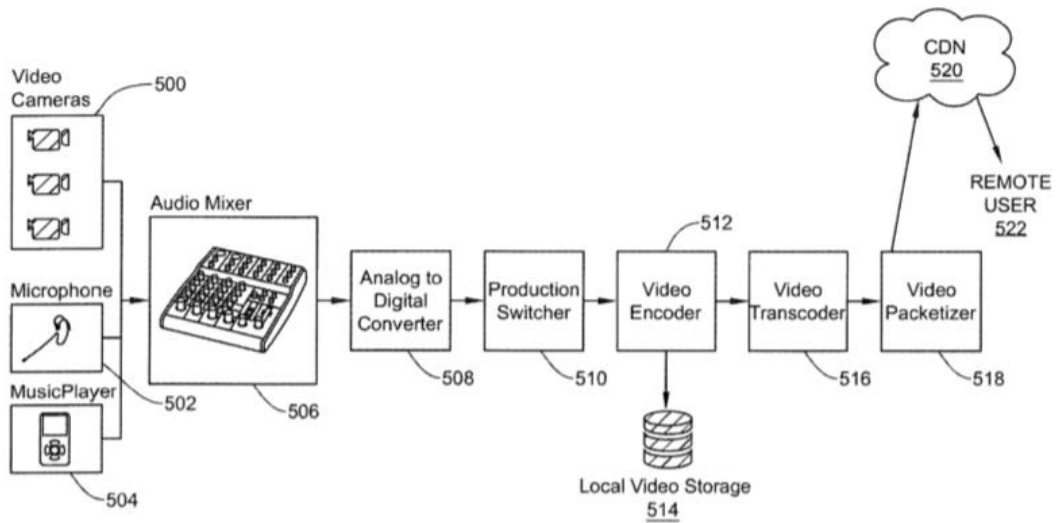


FIG. 15

Ilustración 15 - Diagrama del sistema de generación de contenido.

Las comunicaciones permiten la retransmisión de diferentes tipos de información, ya sea uno o varios canales de vídeo, audio incluyendo voz y música, así como datos tanto de rendimiento como estadísticas vitales, chat y basadas en texto, voz y otras comunicaciones.

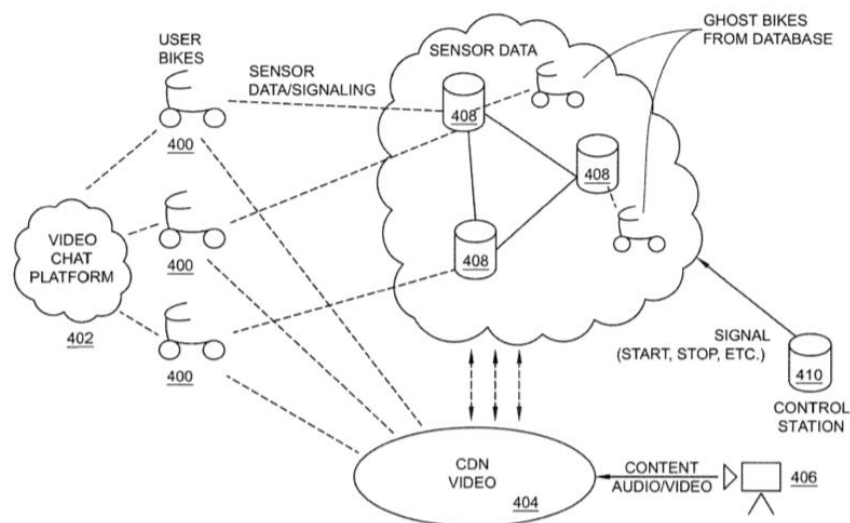


FIG. 16

Ilustración 16 - Diagrama representativo de la comunicación entre los distintos nodos.

El acceso a las clases grabadas y en directo se puede realizar por un número potencialmente ilimitado de usuarios y en el caso de las grabaciones, bajo demanda del usuario.

La bicicleta cuenta con ajustes dimensionales para adaptarse a la mayor población posible, así como ajustes de la fuerza requerida para hacer girar los pedales, mediante un volante de inercia u otro mecanismo apropiado. Los equipos electrónicos asociados a la bicicleta estática pueden ser integrados en la misma o localizados remotamente y conectados de manera inalámbrica. La pantalla puede estar integrada o ser instalada en la línea de visión directa del usuario.

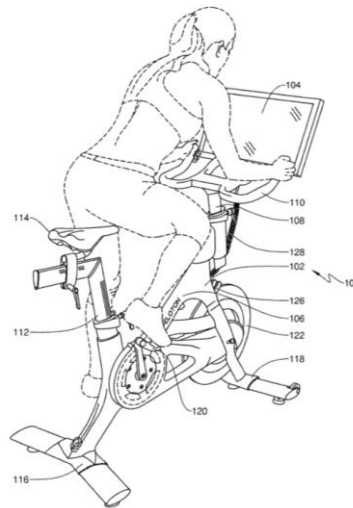


FIG. 2

*Ilustración 17 - Terminal que muestra la actitud de un usuario.*

Los equipos digitales pueden incluir almacenamiento, procesamiento y comunicaciones, software y una o más entradas y salidas para información, como son pantallas, cámaras, micrófonos, teclados, pantallas táctiles, auriculares y altavoces. Pudiendo estar integrados en la bicicleta estática.

El sistema puede incluir diferentes sensores para medir parámetros tanto de la bicicleta como del usuario tanto de manera instantánea como a lo largo del tiempo. De tal manera que se pueden medir la potencia generada por el usuario por medio de sensores de resistencia magnética o un sistema de monitorización de corrientes de Eddy que provea medidas continuas de potencia durante el uso. Y en general parámetros de

rendimiento que se pueden mostrar al usuario, favoreciendo su progreso. (United States Patent N.º US9861855B2, 2018)

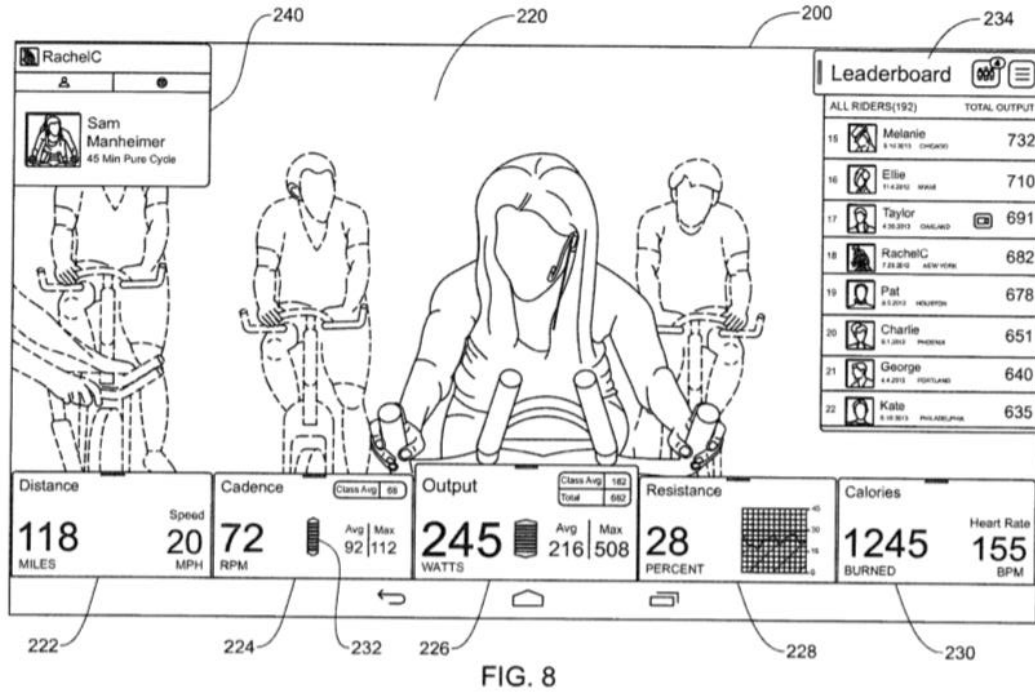


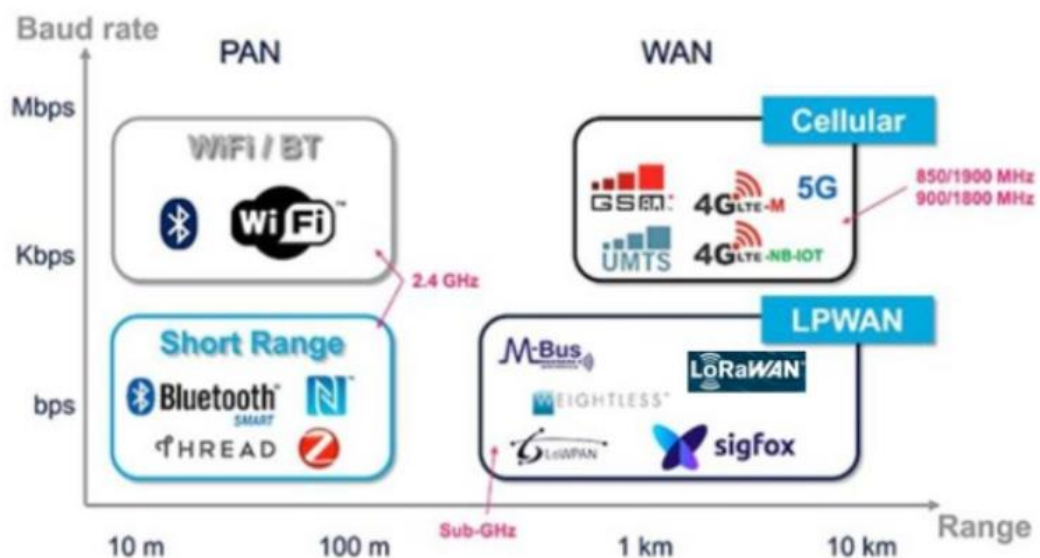
Ilustración 18 - Ejemplo de interfaz de usuario.

## 2. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se describen las tecnologías que soportan el funcionamiento de la aplicación. Al tratarse de una aplicación de la mecatrónica hay tecnologías relacionadas tanto con la mecánica, como eléctricas, así como algunas de ellas son informáticas. También hay algoritmos de control que regulan algunas de las funciones del sistema.

### 2.1. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

La comunicación entre personas es un punto esencial de la evolución humana que nos da una ventaja importante frente a otras especies. Permite transferir información entre generaciones, pudiendo construir sobre descubrimientos anteriores en lugar de estar atrapados infinitamente en el mismo ciclo de aprendizajes rudimentarios.



*Ilustración 19 - Comparativa de tecnologías complementarias de comunicación inalámbrica (Fuente: STMicroelectronics)*

Lo mismo sucede con la intercomunicación entre máquinas, provee un medio para que puedan compartir información, de tal manera que esta llega a donde se necesita, y

permite mejorar la operación del conjunto mediante el su uso apropiado. Evitando que cada máquina por separado deba adquirir de forma redundante la misma información una y otra vez. Permitiendo la especialización y evitando los costes tanto económicos como ambientales asociados a la repetición de estructuras, por ejemplo, en este caso de sensorización.

Al combinar los puntos anteriores se produce una sinergia entre las máquinas y las personas, que posibilita el intercambio de cantidades ingentes de información entre puntos distantes. Hecho que de forma orgánica amplifica el beneficio de la comunicación natural entre personas, y además añade una interfaz homogénea con los datos independientemente de su procedencia. Esto introduce una serie inquietudes como por ejemplo el cariño que se debe prestar a la verificación de la autenticidad de la fuente y la protección de los datos frente a acciones malintencionadas como pueden ser su alteración o parodia por agentes nefarios.

Hace tiempo que una red de comunicaciones no está atada de forma sólida al concepto de transmisión por cable, de forma que a medida que progresa la historia, la transmisión de datos de forma inalámbrica se ha ido sofisticando. Desde los primeros experimentos del físico alemán Rudolf Hertz a finales del siglo XIX, pasando por la implementación de la primera red local inalámbrica ALOHAnet desarrollado por la Universidad de Hawái a finales del siglo XX, hasta llegar a la ubicuidad de las redes inalámbricas que se experimenta a principios del siglo XXI, y que plantea tantos y nuevos retos. Destaca el aspecto de la seguridad y también la saturación de las bandas de frecuencia establecidas.

De hecho, las comunicaciones inalámbricas presentan diversas ventajas que hacen que actualmente estén ampliamente extendidas en numerosos campos de aplicación. Ya sea por su flexibilidad a la hora de hacer cambios en las redes, lo que en su análogo cableado requeriría llevar a cabo actuaciones caras como el reemplazo de los cables. Como también por la facilidad con la que se pueden unir nuevos dispositivos, así como



la movilidad que estos pueden tener dentro de la red, al no estar restringidos físicamente por la longitud de un cable.

Estas razones, entre muchas otras, hacen que sea razonable utilizar las comunicaciones inalámbricas para diversas tareas, y que estas sean el medio principal de comunicación de un dispositivo. Por ello a continuación se hace un desarrollo de las principales tecnologías inalámbricas de las que se dispone actualmente en el entorno civil de consumo. Aunque los estándares abarcan y describen numerosos tipos de tecnologías, se comentarán aquellas más relevantes que se encuentren implementadas en componentes comerciales y sean ampliamente utilizadas.

Las comunicaciones inalámbricas involucran cualquier forma de comunicación en la que no se emplean cables. La información puede ser transmitida entre dos o más puntos que no están físicamente conectados. La distancia de comunicación varía desde los pocos centímetros como en el caso de comunicación de campo cercano (NFC p.s.s. en inglés), hasta los cientos de kilómetros como en el caso de los sistemas de posicionamiento global (GPS p.s.s. en inglés) y las comunicaciones de espacio profundo que se llevan a cabo con las sondas espaciales.

Las comunicaciones inalámbricas han existido desde hace mucho tiempo. Al principio la gente podía transmitir mensajes a larga distancia utilizando señales de humo para comunicar mensajes codificados a grandes distancias. Más tarde se popularizó el uso de palomas mensajeras para llevar a cabo una tarea similar, en la que se entregaban mensajes escritos (Descrito sarcásticamente en los estándares RFC1149 RFC2549 RFC6214). Estas son tecnologías de comunicación inalámbrica que se utilizaban ya mucho antes de que se hubieran inventado las comunicaciones por cable.

En la actualidad, las comunicaciones inalámbricas se encuentran en casi cualquier lugar. Estamos rodeados de dispositivos como teléfonos móviles, mandos a distancia, auriculares inalámbricos, radios FM, televisión terrestre y por satélite, teléfonos sin cables, juguetes inalámbricos, navegadores y otros dispositivos GPS, tarjetas

inteligentes. Todos estos dispositivos tienen en común el uso de las comunicaciones inalámbricas para transmitir datos.

Algunos de los mayores beneficios de las comunicaciones inalámbricas incluyen:

La movilidad, permitiendo a los usuarios la flexibilidad para moverse mientras siguen conectados, en contraposición a estar restringidos por la longitud de un cable.

Tiempo de inicialización reducido, en muchas ocasiones basta con encender el dispositivo para que empiece a comunicarse, al contrario que en sus parientes cableados, en lo que hay que conectar los cables correctamente.

Costes reducidos, debido a que no es necesario establecer infraestructuras de cable con un alto coste. De hecho, en algunos países las conexiones móviles han superado a las fijas debido a los costes reducidos de infraestructura.

Conectividad en áreas remotas, es mucho más sencillo proveer conectividad en lugares como desiertos, océanos, bosques y aldeas remotas utilizando tecnologías inalámbricas en comparación con el despliegue de tecnologías cableadas. Siendo de hecho en algunos casos poco aconsejable o imposible de realizar.

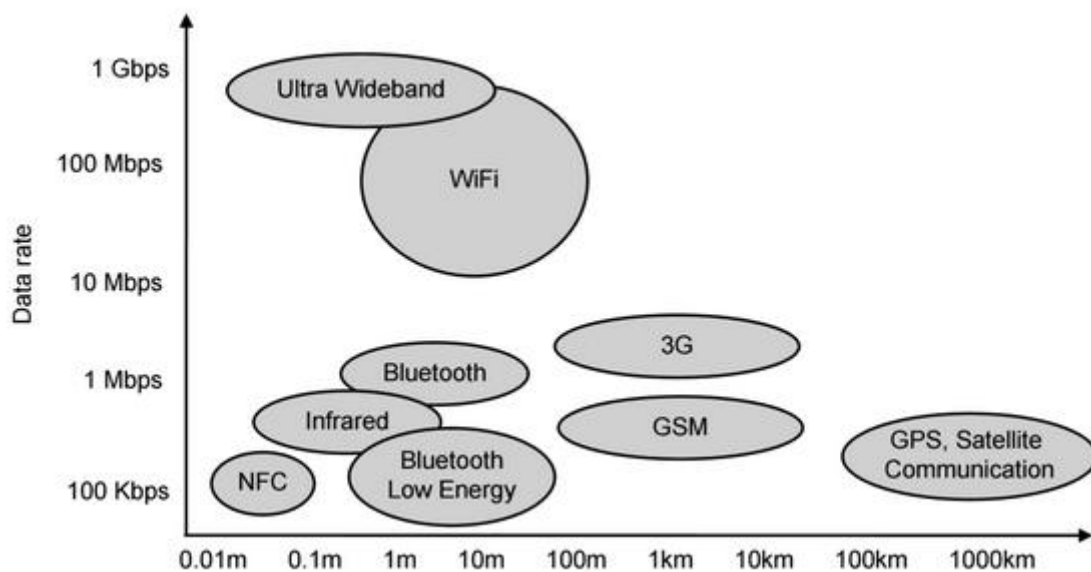
Aumento de la productividad, al permitir que los trabajadores continúen conectados a su lugar de trabajo incluso cuando están desplegados en una operación de campo.

Nuevas posibilidades, las tecnologías inalámbricas permiten escenarios como las comunicaciones de espacio profundo, la navegación por satélite, servicios basados en localización y comunicación con áreas remotas. Estas no son posibles con comunicaciones por cable.

Seguridad, las comunicaciones inalámbricas permiten a los servicios de emergencia como el 112 y sus servicios de localización de usuarios, funcionar y proveer asistencia en ubicaciones remotas.

Sin compromisos en la velocidad, las redes inalámbricas actuales son capaces conservar las características de las redes cableadas e incluso superar a sus contrapartes cableadas.

Debido al amplio número de aplicaciones de las comunicaciones inalámbricas han aparecido diversas tecnologías especializadas en determinados escenarios. Por tanto, existen sistemas que permiten transmitir desde unos pocos kibibits (Kibps) por segundo hasta varios gibibits por segundo (Gibps). En la zona baja del espectro se encuentran tecnologías como el NFC, Bluetooth Low Energy, Zigbee, identificación por radiofrecuencia (RFID p.s.s. en inglés) y ANT que ofrecen tasas de datos en el entorno de unos pocos Kibps o menos. En la zona alta están tecnologías como USB inalámbrico (bus serie universal inalámbrico p.s.s. en inglés), Wi-Fi, y ultrawideband (UWB p.s.s. en inglés) que pueden ofrecer tasas de varios cientos de Mibps hasta unos pocos Gibps.



*Ilustración 20 - Comparación de diferentes sistemas de comunicación ordenados por tasa de bits y alcance de los enlaces. Ambos ejes están en escala logarítmica. (Fuente: Inside Bluetooth Low Energy, Second Edition)*

Las tecnologías de comunicación (inalámbricas y cableadas) se pueden clasificar según las distancias en las que se utilizan. Algunas de estas categorías se comentarán a continuación (Gupta, 2016).

Red de área amplia (WAN p.s.s. en inglés): Cubre un área geográfica amplia, desde unos pocos hasta miles de kilómetros. Incluye tecnologías como GSM (originalmente *Groupe Spécial Mobile*, también conocido como sistema global para comunicaciones móviles p.s.s. en inglés), el servicio general de paquetes de radio (GPRS p.s.s. en inglés), 3G, 4G LTE, 5G y sucesivas tecnologías de conmutación de paquetes sobre enlaces de radio móviles. Así como el acceso multiplexado por división de código (CDMA p.s.s. en inglés).

Red de área metropolitana (MAN p.s.s. en inglés): Cubre un área inferior a WAN, típicamente un pueblo pequeño o núcleo urbano. Incluye tecnologías como interoperabilidad global para acceso por microondas (WiMAX p.s.s. en inglés) que da cobertura en varios kilómetros.

Red de área local (LAN p.s.s. en inglés): Da servicio típicamente a unos cuantos cientos de metros. Lo que puede ser un edificio, un campus y otras instalaciones de este tipo. Incluye tecnologías como el Wi-Fi.

Red de área personal (PAN p.s.s. en inglés): Agrupa la comunicación entre dispositivos personales como teléfonos móviles, mandos a distancia, teclados y ratones, cámaras de fotos. Su alcance típico es de unos pocos metros. Incluye tecnologías como la asociación de datos por infrarrojos (IrDA p.s.s. en inglés), bluetooth, bus serie universal (USB p.s.s. en inglés), comunicación de campo cercano (NFC) y Zigbee.

Red de área corporal (BAN p.s.s. en inglés): Abarca la comunicación entre dispositivos que se supone que las personas deben llevar encima o puestos. Estos incluyen dispositivos como teléfonos móviles, auriculares, relojes y equipamiento deportivo como monitores de la presión sanguínea o del ritmo cardiaco. Incluye tecnologías como Bluetooth, RFID, NFC y ANT.

En lo que respecta a la estandarización, juega un papel vital en la investigación y desarrollo: fomenta la adopción global de la tecnología, la estandarización de los productos, y que los fabricantes se aseguren de que sus productos son interoperables

con los de otras marcas, así como la protección frente a la infracción de patentes. Hay una serie de organizaciones que se ha sumado a esta tarea para desarrollar estándares y asegurar su amplia aceptación. Además, los estándares ayudan al consumidor bajando los precios y construyendo un ecosistema de empresas que contribuyen a la innovación, la producción en masa de los productos y la competición justa entre los proveedores. De tal forma que los consumidores pueden elegir un fabricante en función del precio en lugar de la comparación de características.

Del mismo modo los estándares ayudan al cumplimiento de las regulaciones a nivel global. Lo que es especialmente cierto en el mundo de las comunicaciones inalámbricas, ya que estos productos pueden contener transmisores y pueden existir restricciones legales en lo que se refiere a las frecuencias y potencias de transmisión permitidas (Gupta, 2016).

Existen diversas organizaciones que están trabajando en la creación de estándares y regulaciones. Entre ellas destacan: 3GPP, Bluetooth SIG, CEN, ETSI, FCC, IEC, IEEE, ISO, ITU, Wi-Fi Alliance, Near Field Communication Forum, ZigBee Alliance. Información sobre estas organizaciones puede ser ampliada en sus respectivos sitios web, siempre con un mayor carácter actual que cualquier exposición que pueda envejecer con este documento.

### 2.1.1. Bluetooth LE (IEEE 802.15.1)

Bluetooth es un estándar para comunicaciones inalámbricas de corto alcance, con baja potencia, bajo coste y pequeño tamaño de implementación. Permite la comunicación de varios dispositivos sobre enlaces de radio. Se pensó como un sustituto de los cables para transmisión de datos serie que interconectan algunos dispositivos. A lo largo de los años los casos de uso se han extendido al intercambio de datos entre PC's, móviles, la reproducción de audio, la impresión de documentos, así como la gestión de llamadas desde los manos libres y vehículos que lo permiten, entre otros.

Hoy en día la tasa de agregación es de prácticamente el 100% en teléfonos móviles, tablets y dispositivos portátiles. Bluetooth también está ampliamente extendido en los auriculares inalámbricos, altavoces, cámaras, manos libres, videoconsolas y periféricos como teclados, ratones, impresoras y otros.

Bluetooth Low Energy (también conocido como LE) es una de las últimas mejoras incrementales de la tecnología. Fue introducido junto con la especificación Bluetooth 4.0 y está pensado, como su nombre sugiere, para dispositivos de bajo consumo. Esta tecnología fue conocida como *Wibree* y *Ultra Low Power (ULP)* en el pasado.

Bluetooth LE extiende las capacidades de bajo consumo de Bluetooth aun más. Por lo tanto, los dispositivos que cumplen con este estándar deberían consumir muy poca energía, de tal manera que pueden operar durante meses o años en una pila de botón o pequeñas baterías. Lo que es especialmente útil en situaciones en las que es difícil recargar la batería con frecuencia y una larga duración de la batería es importante. La comunicación se suele producir en ráfagas cortas que no necesitan ser muy frecuentes. Así que es más adecuado para dispositivos que no requieren grandes anchos de banda ni un flujo constante de datos (Gupta, 2016).

Existen diversas aplicaciones que cumplen la descripción anterior, algunas de ellas son: Internet de la cosas, dispositivos médicos como termómetros, tensiómetros y glucómetros, equipamiento deportivo, automatización del hogar, entretenimiento

doméstico, medidores para *Smart energy*, anuncios, pagos móviles, dispositivos para automoción como sensores de la presión de los neumáticos, unidades de medición inercial, sensores de temperatura y sensores de contaminación, así como aplicaciones de seguridad.

Bluetooth Low Energy presenta algunas ventajas frente a otras tecnologías de comunicación de baja energía y corto alcance como la identificación por radiofrecuencia (RFID p.s.s. en inglés) que utiliza obleas de silicio alimentadas de forma inalámbrica por el lector, o en concreto la comunicación de campo cercano (NFC por sus siglas en inglés) presente en algunos teléfonos inteligentes actuales. Bluetooth LE puede construir sobre la infraestructura Bluetooth existente, especialmente en lo referente a *smatphones*, *tablets* y PC's portátiles. De tal forma que estos dispositivos pueden actuar como puerta de enlace (*gateway*) para sensores Bluetooth con un coste incremental muy bajo para el usuario. De tal manera que se desbloquee una serie de casos de uso con un coste muy bajo para el usuario, lo que hace prever un incremento de los dispositivos soportados por esta tecnología en los próximos años.



*Ilustración 21 - Logotipo del dispositivo Bluetooth que combina las runas Hagall y Berkana que corresponden a las iniciales de Harald Bluetooth.*

Aunque el BLE requiere el uso de pilas para su alimentación, su consumo es muy bajo y un dispositivo puede funcionar durante años con una pila. Su tasa de transferencia de datos, es más elevada que la de otras tecnologías (Harris, Khanna, Tuncay, & Kravets, 2016).

El uso de Bluetooth LE, de muy bajo consumo, permite reducir la cantidad de energía consumida en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT p.s.s. en inglés). Especialmente las relacionadas con las redes de sensores inalámbricos (WSN p.s.s. en inglés). En los últimos años se han venido haciendo esfuerzos para realizar WSN

eficientes, de bajo coste, escalables y fácilmente desplegados. De hecho, para reducir costes y mejorar la duración de la batería de un nodo sensor, es necesario optimizar su uso de la batería y su consumo de energía. Para ello se toma en cuenta BLE como un candidato potencial para reducir la energía en IoT WSN. También se pueden establecer detección de actividad fundamentada en BLE, e incorporarlo al sistema para evitar derrochar energía en monitorización en tiempo real (Nair et al., 2015).

Esta tecnología permite la monitorización de dispositivos cercanos de tal manera que se puede ofrecer información relevante del entorno inmediato del usuario basándose en la proximidad de ambas partes. De tal manera que el usuario puede por ejemplo recibir recomendaciones de ejercicios en función de su proximidad a una determinada máquina.

El reto de esta tecnología consiste en definir qué es lo que está más cerca y recoger la información necesaria de manera eficiente tanto energéticamente como en ancho de banda. Este último es crítico ya que la presencia de grandes cantidades de estos dispositivos puede saturar rápidamente el espectro de emisión si no se gestiona cuidadosamente.

Cabe destacar que recientemente el incremento de la popularidad de los dispositivos inteligentes y especialmente los seguidores del estado físico (*Fitness trackers* en inglés) han incrementado en gran medida el número de dispositivos que utilizan BLE como tecnología de comunicación y sincronización con otros dispositivos como teléfonos inteligentes. Esto ha motivado que entes nefarios e investigadores de seguridad informática hayan amentado sus esfuerzos en encontrar vulnerabilidades en la tecnología en los últimos años.

Además, debido a la naturaleza de estos dispositivos la información que pueden fugar puede ser un problema de privacidad. Ya que tal y como se ha demostrado en capturas de tráfico en campo y en experimentos controlados se ha observado que la mayoría de los *fitness trackers* utilizan direcciones BLE que no cambian en la fase de anuncio de los servicios, lo que permite hacer un seguimiento de estos. Además, se



observa que el tráfico BLE de los *fitness trackers* está correlado con la intensidad de la actividad del usuario, lo que hace posible que una escucha no autorizada determine la actividad actual del usuario (caminar, sentarse, ocioso o corriendo) a través del análisis del tráfico BLE.

Además, se ha demostrado que el tráfico BLE puede representar el paso / modo de andar del usuario, que se conoce que es distinto de un usuario a otro, por lo que es posible identificar a una persona (a partir de un pequeño grupo de usuarios) por el tráfico BLE de su *fitness tracker*. Dichos problemas no harían más que acrecentarse con la mejora de la tecnología que incorporase más y mejores sensores y mayor capacidad de procesado y transmisión de información. Por tanto a medida que los dispositivos BLE vestibles (*wearables* en inglés) comienzan a estar ampliamente adoptados por un gran número de usuarios, es más importante si cabe identificar implicaciones de privacidad que les puedan concernir y discutir estrategias de prevención (Das, Pathak, Chuah, & Mohapatra, 2016). Debido a la popularidad de esta tecnología y la preocupación por su seguridad está madurando rápidamente. Lo que la convierte en una tecnología de comunicación de corto alcance muy prometedora. Aunando las características de seguridad con sus capacidades de reducción del consumo energético, BLE se ha convertido en el estándar dominante para la comunicación de *fitness trackers* con teléfonos inteligentes.

Bluetooth cuenta con algunas características clave. Entre ellas destaca su capacidad para crear conexiones punto a punto (Ad hoc) sin infraestructura previa como en el caso de los puntos de acceso wifi, o rúters en una red cableada.

Bluetooth Low Energy es una tecnología de redes de área personal inalámbricas (WPAN p.s.s en inglés) diseñada y promovida por el *Bluetooth Special Interest Group* (Bluetooth SIG) que está pensada para el desarrollo de aplicaciones novedosas en los campos de salud, entrenamiento físico, así como balizamiento y las industrias de seguridad y entretenimiento en casa. Se diferencia de Bluetooth en el sentido clásico, en que la variante BLE está pensada para reducir el consumo de energía y coste de los



dispositivos mientras mantiene un alcance de comunicación similar. Diversos sistemas operativos soportan de forma nativa BLE.

Debido a sus características de bajo consumo, BLE no es retro compatible con Bluetooth BR/EDR (En ocasiones denominado *Bluetooth Classic*). Bluetooth Low Energy utiliza la misma banda ISM (Industrial Científica y médica p.s.s en inglés) que el Bluetooth clásico, 2.4 GHz. Lo que permite que dispositivos con ambos modos de operación compartan la antena de radio. Cabe destacar que BLE utiliza un sistema de modulación más simple.

## 2.1.2. ANT y ANT+

Es una tecnología probada de ultra bajo consumo que es responsable del envío de información de forma inalámbrica entre dispositivos de forma robusta y flexible. Cuenta con millones de nodos desplegados, y está capacitado para transmitir cualquier tipo de información con baja tasa de envío de datos en una red de sensores. Puede funcionar en topologías *peer-to-peer*, así como estrella, o incluso en una topología *mesh* orgánica. En configuraciones de área personal (PAN) es adecuado para equipamiento deportivo, tanto de *fitness*, como de *wellness*, aplicaciones de salud domésticas. También es una solución práctica para el desarrollo de redes de área local (LAN) en hogares y aplicaciones de automatización industrial.

ANT está específicamente diseñado para redes inalámbricas de sensores (WSNs) que requieren: Consumos muy bajos, optimización de recursos (capaz de operar en memorias compactas), flexibilidad y escalabilidad en la red y facilidad de uso en un sistema de bajo coste.

ANT+ representa una función de interoperabilidad que se puede añadir al protocolo base ANT. Lo que facilita la recolección, transferencia automática y seguimiento de los datos de sensores. ANT+ está encontrando aplicaciones en equipamiento deportivo y de bienestar como monitores de ritmo cardíaco, relojes deportivos, bicicletas, termómetros etc. (Gupta, 2016).

### 2.1.3. LoRa - LoRaWAN

LoRa es una tecnología inalámbrica novedosa que opera en la banda ISM (Industrial, científica y médica por sus siglas en inglés) diseñada para transmisiones de largo alcance, baja potencia y sin requerir licencia. LoRaWAN por su parte es un protocolo de red de área amplia (WAN p.s.s. en inglés) que incorpora la tecnología inalámbrica LoRa en una infraestructura de red. El resultado de esta tecnología es un enlace fiable para aplicaciones de bajo coste en sensorización remota.

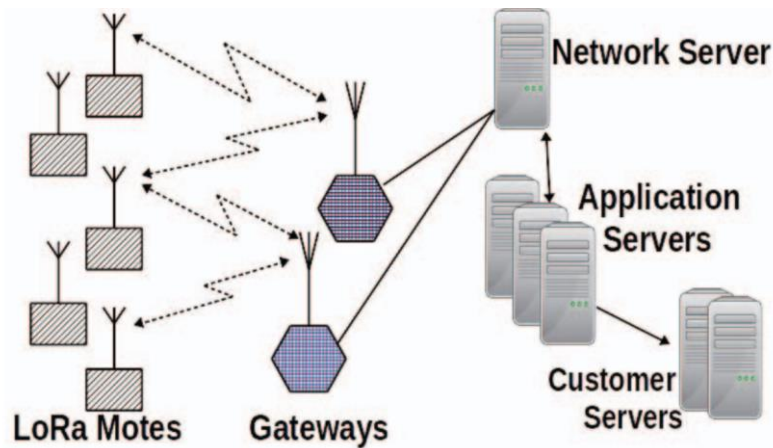
Cuando se provee conectividad máquina a máquina (M2M) como ya se ha detallado existen numerosas alternativas de comunicación incluyendo las cableadas. Sin embargo, cuando se trata de la transmisión de pequeñas cantidades de datos a localizaciones remotas, en caso de que el equipamiento tenga valor suficiente se puede utilizar la red celular móvil o módems por satélite. Entonces existen algunos casos de uso que no están cubiertos por las otras tecnologías. Existe una plétora de casos de uso de sensorización de bajo coste en los que el reducido coste del equipamiento no justifica el uso de una conexión móvil de datos, pero la distancia es demasiado grande para las tecnologías existentes en la banda ISM.

Con la expansión de las redes M2M, que se conocen popularmente como internet de las cosas (IoT p.s.s. en inglés) continúa la competición por establecer tecnologías de bajo coste en el campo de largo alcance. LoRa en particular es una marca registrada de Semtech y es un ejemplo de tecnología que opera en banda ISM de largo alcance. Otras tecnologías similares incluyen Sigfox, un servicio de red basada en suscripción en el que la compañía Sigfox ha establecido estaciones base en numerosas ciudades y regiones. Los dispositivos de radio de bajo coste de la empresa Sigfox pueden ser incorporados en un sistema de sensores y transmitir decenas de bytes en un paquete a la estación base. Entonces Sigfox puede enrutar el tráfico a su dueño. En este servicio el número de paquetes transmitidos al día depende del nivel de suscripción de pago.

Otras tecnologías competidoras incluyen On-Ramp, que es una solución de red enteramente propietaria que reivindica una ventaja significativa en los requerimientos de estación base en comparación con LoRa o Sigfox. También existen Zigbee de largo alcance, nWave (una radio definida por software -SDN p.s.s. en inglés- de banda ultra estrecha) y algunos otros menos relevantes. El apagado inminente o ya sucedido de las redes móviles 2G y/o 3G en numerosos países, ha centrado la atención en las redes 4G con la proposición de NB-IoT, un servicio de banda estrecha para comunicaciones M2M usando el espacio de bandas con licencia para redes de comunicaciones móviles. LTE-MTC (siglas en inglés de *Long-Term-Evolution Machine-Type-Communications*, ahora LTE-M) y NB-LTE-M son todas tecnologías móviles rivales. Todas estas tecnologías son necesarias para ocupar el espacio dejado por la caída de la tecnología de bajo coste y baja potencia fundamentada en tecnología 2G M2M (Wixted et al., 2016).

La tecnología inalámbrica LoRa utiliza modulación CSS (*chirp-spread-spectrum*) con opciones para diferentes SF (*spreading factors*) y anchos de banda para optimizar la modulación a los requerimientos de alcance y cantidad de datos. LoRa utiliza la banda ISM de 433MHz, 868MHz o 915MHz dependiendo de la jurisdicción y con la banda dividida en canales. La combinación de SF y ancho de banda compromete velocidad a cambio de alcance. En Europa la potencia de transmisión está limitada a 14dBm EIRP con un ciclo de trabajo máximo de el 1% de tiempo transmitiendo (*on-air time*). Dependiendo de la modulación y la potencia de transmisión el presupuesto de enlace puede ser tan alto como 156dB.

LoRaWAN (una marca registrada de la LoRa Alliance) involucra una pila de protocolos con la tecnología inalámbrica LoRa como capa física. Un mote de LoRaWAN se comunica a través de radio con una puerta de enlace (*gateway*) que incorpora un receptor concentrador capaz de decodificar 10 transmisiones concurrentes. Los *gateways* se comunican con un servidor de red (*Network Server*).



*Ilustración 22 - Topología LoRaWAN, donde los motes pueden pertenecer a cualquiera. (fuente: Wixted et al., 2016).*

Si se detecta una transmisión de un mote por múltiples *gateways* el *network server* decide cual utilizar para enviar la confirmación de recepción (*acknowledgement* o ACK para abreviar) si se requiere. El *network server* pasa el paquete de datos al servidor de aplicación y este a su vez envía los datos al servidor del cliente. Cuando se utiliza autenticación OTA (*Over The Air*) la autenticación sucede en el servidor de aplicación. Además, este permite la agregación en grupo de numerosos motes en una aplicación. En la que un cliente puede tener motes de diversos tipos y en sendas localizaciones. La aplicación es un grupo administrativo y tiene su propia clave de encriptación (Wixted et al., 2016).

Los operadores de red están comenzando a desplegar soluciones horizontales M2M para cubrir verticales a gran escala, utilizando tecnologías de red de área amplia de baja potencia (LPWAN). Las aplicaciones incluyen ciudades inteligentes, medidas telemáticas, control de la iluminación urbana o agricultura de precisión. La tecnología LPWAN combina bajas tasas de datos y una modulación robusta para conseguir alcances de comunicación de varios km. Esto permite llevar a cabo topologías de estrella simple, que simplifican el despliegue de la red y su mantenimiento. Aun cuando los beneficios de estas tecnologías son conocidos y son comúnmente aceptados como posibilitadores clave para algunas aplicaciones, sus limitaciones aún no se entienden correctamente (Adelantado et al., 2017).

La tasa máxima de transmisión de LoRaWAN es de 27 kbps (50 kbps cuando se utiliza modulación FSK en lugar de LoRa), y reivindica que un solo gateway puede recoger información de miles de nodos desplegados a kilómetros de distancia. Dichas capacidades han resonado con proveedores de soluciones y operadores de red, creando momento tras la idea de LoRaWAN hasta el punto de que en ocasiones se han referido a esta tecnología como el habilitador de conectividad para todos los casos de uso de IoT.

Sin embargo, haciendo un análisis honesto y exhaustivo de las capacidades y limitaciones de la tecnología se identifican los casos en los que funciona, y aquellos en los que no. LoRa es la capa física utilizada en LoRaWAN. Tiene operación en baja potencia (resulta en 10 años de duración de la pila), baja tasa de datos (27 kbps con factor de *spreading* de 7 y canal de 500 kHz, ó 50 kbps con FSK) y un largo alcance de comunicación, entre 2 y 5 kilómetros en zonas urbanas y en torno a 15 en áreas suburbanas. Las redes LoRaWAN se organizan en topologías de estrellas de estrellas en el que los nodos gateway retransmiten entre los *end-devices* y un servidor central de red. Los *end-devices* envían datos a los *gateways* en un solo salto inalámbrico y los *gateways* están conectados al servidor de red por otra red no LoRaWAN, por ejemplo, IP sobre redes móviles o Ethernet. La comunicación es bidireccional, aunque la comunicación en el enlace de subida de los nodos está fuertemente favorecida.

LoRaWAN define tres tipos de dispositivos, con diferentes capacidades: A, B y C. Los dispositivos de clase A usan acceso ALOHA puro para el enlace de subida. Tras enviar una trama, el dispositivo de clase A escucha una respuesta durante dos ventanas de recepción del enlace de bajada.

Cada ventana de recepción está definida por la duración, el parámetro de compensación de tiempo y la tasa de datos. Solo se permite transmisión en el enlace de bajada después de una transmisión satisfactoria por el enlace de subida. Tienen el menor consumo energético.

Los dispositivos de clase B están diseñados para aplicaciones con necesidades adicionales en el enlace de bajada. Estos dispositivos se sincronizan con balizas periódicas emitidas por la puerta de enlace, para permitir la planificación de las ventanas de recepción adicionales para el tráfico en el enlace de bajada sin un envío satisfactorio de tráfico por el enlace de subida primero. Existe un compromiso entre el tráfico de bajada y el consumo energético elevado.

Los dispositivos de clase C están siempre escuchando el canal excepto cuando están transmitiendo. Solo se debe implementar la clase A en los dispositivos del extremo (*end devices*), mientras que las otras clases deben ser compatibles con la clase A. En cambio, la clase C no debe implementar también la clase B. Las tres clases pueden coexistir en la misma red. Los dispositivos pueden cambiar de una clase a otra. Sin embargo, LoRaWAN no especifica un mensaje concreto para informar a la puerta de enlace del tipo de dispositivo, esto lo debe hacer la aplicación. La capa física subyacente de las tres clases es la misma. La comunicación entre los dispositivos del borde de la red y la puerta de enlace se inicia con un procedimiento *Join* que puede ocurrir en múltiples canales frecuenciales. Para más detalles se puede consultar la bibliografía (Adelantado et al., 2017).



### 2.1.4. RFID / NFC (ISO 14443)

La comunicación de campo cercano (NFC) hace la vida más fácil a los consumidores a lo largo del mundo posibilitando transacciones más sencillas, el intercambio de contenido digital y la conexión de dispositivos electrónicos con un toque. NFC es una tecnología basada en estándares que armoniza las diversas tecnologías sin contacto permitiendo soluciones actuales y futuras en áreas como el control de acceso, la electrónica de consumo, el cuidado médico, la recolección e intercambio de información, los sistemas de lealtad de marca y cupones, los pagos y el transporte entre otros.



*Ilustración 23 - Logo representativo de la tecnología NFC (fuente: (WP:NFCC#4), Uso legítimo.)*

NFC proporciona una serie de ventajas a los consumidores y negocios, en particular que es intuitivo, ya que las interacciones solo requieren un toque. Además, es versátil siendo apropiado para una gama muy amplia de industrias, entornos y usos. Está fundamentado en estándares abiertos, ya que las capas subyacentes siguen estándares globalmente implementados de organizaciones como ISO, ECMA y ETSI. Es una tecnología posibilitadora de otras, ya que permite la configuración simple y rápida de otras tecnologías inalámbricas como Bluetooth y Wi-Fi. NFC es inherentemente segura, ya que las transmisiones se producen a corta distancia, desde un toque hasta unos pocos centímetros. Es interoperable, ya que funciona con tecnologías existentes de tarjetas sin contacto. Además es capaz de soportar aplicaciones seguras (Gupta, 2016).

### 2.1.5. Wi-Fi (IEEE 802.11)

Se trata de una familia de tecnologías de radio, que se usan comúnmente para conformar redes de área local inalámbricas. Está fundamentado en la familia de estándares del IEEE 802.11. El término Wi-Fi es una marca registrada del organismo denominado Wi-Fi Alliance, que restringe el uso del término Wi-Fi Certified a productos que superan una prueba de certificación de interoperabilidad.



*Ilustración 24 - Logotipo previo de la "Wi-Fi Alliance".*

Wi-Fi se nutre de múltiples partes de la familia de protocolos del IEEE 802, y está diseñado para cooperar de forma transparente con su pariente cableado el Ethernet. Debido a las características de diseño, Wi-Fi es especialmente útil en la interconexión de dispositivos que requieren más ancho de banda con un alcance de cobertura no demasiado elevado.

Las potencias de emisión son relativamente bajas, aunque comparativamente más altas que otras tecnologías expuestas en este documento. Usualmente los dispositivos se conectan a un punto de acceso. Aunque también es posible realizar conexiones Ad hoc, es decir conectar dos dispositivos directamente sin la infraestructura de puntos de acceso, routers y otros medios. Esta última configuración puede utilizarse, entre otros, en aplicaciones de campo para transferir cantidades considerables de datos entre dos dispositivos que permiten conectividad Wi-Fi pero que están fuera del alcance de una red de este tipo.

Debido a las características de esta tecnología, se usa muy frecuentemente para proporcionar acceso a internet, de forma inalámbrica, en espacios interiores. Donde el alcance requerido está limitado por la planta del edificio. De esta forma un punto de acceso inalámbrico puede estar conectado a un router, y este a su vez a otras infraestructuras que pueden conducir a una WAN (Red de área amplia p.s.s. en inglés) y finalmente dar acceso a internet.

El alcance puede ser tan pequeño como una sola habitación en la que las paredes bloquean las ondas de radio hacia el exterior, hasta varios kilómetros cuadrados. Esto último conseguido mediante diversos puntos de acceso ligeramente superpuestos.

Como se comenta anteriormente las diferentes versiones de Wi-Fi se especifican por varios estándares de protocolo IEEE 802.11, con las diferentes tecnologías de radio subyacentes determinando la distancia, bandas de radio utilizadas y velocidades de transmisión de datos que se pueden alcanzar. Wi-Fi habitualmente utiliza la banda de UHF 2.4 GHz (12 cm) y la banda SHF 5 GHz (6 cm). Ambas forman parte del espectro reservado ISM, que precisamente se reserva para usos industriales, científicos y médicos. Dicho espectro no está garantizado por ninguna ley como libre de interferencia, y de hecho algunos dispositivos comunes con potencias considerables operan en ellas, como por ejemplo los hornos de microondas (2.4 GHz). Por lo que los dispositivos Wi-Fi como otros que operan en la misma banda deben ser capaces de admitir dichas interferencias y operar de la mejor manera posible en estas condiciones (Crow, Widjaja, Kim, & Sakai, 1997).

Estas bandas se subdividen en múltiples canales, y cada canal puede estar compartido en el tiempo por múltiples redes. Debido al abundante ancho de banda y a las longitudes de onda utilizadas, es un requisito que ambas antenas estén en línea de visión directa (LOS p.s.s. en inglés). Además, muchos materiales comunes absorben y reflejan las emisiones de este tipo, hecho que restringe aun mas el alcance de la comunicación. Sin embargo, este fenómeno ayuda a minimizar la interferencia entre diferentes redes en entornos muy concurridos. En cuanto a la tasa de transmisión, en



alcances cortos, algunas versiones de Wi-Fi, funcionando en hardware adecuado son capaces de alcanzar velocidades de más de  $1 \text{ Gibit} \cdot \text{S}^{-1}$  (Gibibit por segundo, aprox.  $2^{30}$  bits por segundo).

### 2.1.6. Zigbee (IEEE 802.15.4)

Se trata de un estándar técnico que establece la operación de redes de área personal (PAN p.s.s. en inglés), que son a su vez un tipo de redes para la interconexión de dispositivos en el entorno de trabajo de un individuo. Esta red se puede utilizar para la comunicación de los dispositivos personales entre ellos, o en cambio para proveer acceso a una red de más alto nivel e incluso internet. En este último caso un dispositivo maestro toma el rol de *puerta de enlace* (conocido también por el término en inglés *gateway*), que fundamentalmente permite la transmisión de datos entre dos redes, en este caso de distinta naturaleza. Cabe destacar que las redes PAN pueden ser tanto inalámbricas como cableadas, aunque el objeto de estudio de este documento se centra en la modalidad de radiofrecuencia.

Zigbee tiene en cuenta las necesidades de comunicación en dispositivos de bajo coste y baja potencia para redes de sensores y de control en diversos entornos. Como Zigbee puede ser utilizado prácticamente en cualquier lugar, su implementación es sencilla y necesita poca potencia para funcionar. A continuación, se detallan algunos hechos sobre esta tecnología: Zigbee utiliza radios de 2.4 GHz para ofrecer una variedad de estándares fiables y fáciles de utilizar en cualquier lugar del mundo. Los consumidores, negocios, cuerpos gubernamentales y la industria confían a diario en una variedad de estándares Zigbee inteligentes y fáciles de usar para ganar mayor control sobre sus actividades diarias. Con un rendimiento inalámbrico fiable y capaz de operar con batería, Zigbee ofrece a la gente la capacidad de y la libertad para hacer más. Zigbee ofrece una variedad de estándares novedosos diseñados para ayudar a la gente a ser ecológicos y ahorrar dinero (Gupta, 2016).

El estándar IEEE 802.15.4 define tanto la capa física como la de enlace de redes de área personal de baja tasa (LR-WPAN p.s.s. en inglés). De hecho, existen numerosas tecnologías industriales que se fundamentan en el estándar. Entre las que se encuentran Zigbee, Z-Wave, WIAPA, ISA 100.11a y WirelessHART. Además, en la revisión de 2015 del estándar, se incluyen *Saltos de Canal Ranurados en el Tiempo* (TSCH p.s.s. en

inglés) como modo en la capa de enlace. Permitiendo el acceso determinístico al medio y aumentando la fiabilidad hasta clase industrial. 6TiSCH, un esfuerzo de estandarización del IETF, integra TSCH con IPv6, lo que resulta en redes habilitadas para internet de bajo consumo e inalámbricas con rendimiento industrial. De tal forma que parece una tecnología clave habilitadora del Internet de las cosas (IoT p.s.s. en inglés) a nivel industrial. A pesar de que diferentes tecnologías están siendo (y serán) explotadas para mejorar el rendimiento de las aplicaciones inalámbricas de bajo consumo, todo parece indicar que el estándar IEEE 802.15.4 seguirá siendo un estándar importante en este campo (Chang, Watteyne, Vilajosana, & Gomes, 2019).

Existen diversas tecnologías más o menos populares para crear redes de área personal. Tienen en común su operación sobre el estándar IEEE 802.15.4, que les permite tener un bajo consumo energético a la vez que un ancho de banda modesto. Se introducen diversas técnicas que permiten el ahorro energético, de tal manera que un dispositivo de este tipo puede alimentarse largos periodos de tiempo con cantidades muy escasas de energía. Esto se traduce en implementaciones interesantes, como pueden ser redes de sensores desplegadas desde aeronaves que se dejan caer sobre el terreno de tal manera que su distribución es aleatoria, aunque homogénea. Que, además pueden operar durante meses o incluso años con una pequeña pila.

Esto se debe a que, en la electrónica actual, es común que el elemento más desfavorable por su consumo energético sean los sistemas de transmisión inalámbricos. De hecho, sus consumos se categorizan desde el reposo, pasando por la activación, la escucha que añade un mayor consumo energético y por último la transmisión, que es la operación de estos dispositivos que mayor cantidad de energía requiere. Por lo tanto, un control preciso y eficiente de los susodichos estados puede suponer un ahorro significativo en la energía consumida por el sistema electrónico en su conjunto.

Por otra parte, es posible que se desee transmitir información entre nodos específicos. Siendo esto suficiente para la aplicación en cuestión.

### 2.1.7. 6LoWPAN (IEEE 802.15.4)

Sin embargo, también cabe la posibilidad de que se desee conectar este tipo de nodos de recursos muy limitados, a una red mayor e incluso a internet, para lo que será necesario el uso de algunas técnicas concretas de compresión de las cabeceras de los protocolos y división de las tramas para que sea posible integrar dispositivos tan heterogéneos en una red como Internet. Como se detallará a continuación.

6LoWPAN define como hacer funcionar el protocolo de comunicación estándar por excelencia en el entorno de internet, IP en su versión 6 (IPv6) sobre redes con enlaces de radio de baja tasa de transmisión, baja potencia y pequeño alcance. Como los que describe el estándar de radio IEEE 802.15.4.

Utilizar IP en este tipo de dispositivos en el extremo de la red, tiene la ventaja de que se aplanan la jerarquía de la red y por tanto simplifica el modelo de conectividad. Lo que evita la necesidad de puertas de enlace (*gateways*) complejas que en el pasado eran requeridas para interpretar entre los protocolos propietarios y aquellos estándares propios de internet (IP). Dichos *gateways* pueden ser sustituidos entonces por puentes muchos más simples y *routers*, ambos de los que se tiene un amplio conocimiento, están en elevados estados de madurez tecnológica y están ampliamente disponibles en despliegues reales.

Adicionalmente el uso de protocolos fundamentados en IP permite utilizar herramientas que ya están desarrolladas para la puesta en marcha, configuración, gestión y solución de problemas en dichas redes. Siendo innecesario desarrollar nuevas herramientas para tratar con protocolos propietarios y adquirir nuevas habilidades para hacer uso de dichas herramientas. Además, como la red entera está fundamentada sobre IP los programadores no necesitan aprender y desarrollar habilidades en un nuevo paradigma de programación. De esta manera la red funciona y se programa como cualquier otra aplicación de internet y cuando es necesario depurar la red y problemas

en las aplicaciones, los ingenieros contarán con la experiencia de la depuración de errores de redes IP.

Asimismo, como los protocolos subyacentes son los propios del conjunto IP los diseñadores de aplicaciones de sensorización pueden hacer uso de los estándares existentes para acelerar el proceso de diseño y desarrollo. Por lo tanto, en lugar de tener que empezar de cero para crear un protocolo de gestión, sería más prudente investigar la posibilidad de utilizar SNMP (*Simple Network Management Protocol* p.s.s. en inglés); del mismo modo en lugar de intentar inventar un nuevo mecanismo para mantener todos los nodos sensores en hora se podría simplemente utilizar NTP (*Network Time Protocol* p.s.s. en inglés).

De la misma manera hay toda una plétora de protocolos estándar que se pueden utilizar en aplicaciones de sensorización como UDP, TCP, ICMP, DNS y TFTP. Además, hay muchos servicios de más alto nivel estandarizados, como el reparto de carga, almacenamiento en caché, *Firewalls*, y movilidad, sobre los cuales se podría obtener un beneficio notable de ser usados en este espacio. El concepto se podría extender a la construcción de redes con enrutamiento *mesh* entre los nodos por encima de la capa IP en lugar de por debajo. Además, el empleo de IP tiene trae consigo la ventaja de que hay cierto número de protocolos de control y sensorización heredados que ya han sido adaptados para funcionar sobre IP.

Como ejemplo, la red industrial Profibus tiene un adaptador TCP/IP. Por lo tanto, este tipo de estándares industriales podrían ser usados directamente sin necesidad de un mecanismo de interpretación en el *gateway* para proveer funcionalidad y conectividad. Las aplicaciones heredadas que ya funcionan sobre redes IP podrían ser sencillamente portadas para abarcar estas redes de sensores IP y nodos de control. Para finalizar existen diversas arquitecturas y protocolos ya desplegados y probados que tratan con las necesidades de seguridad de estas redes.

6LoWPAN es un estándar en desarrollo del IETF (Internet Engineering Task Force p.s.s. en inglés) diseñado desde el principio para ser usado en redes de microsensores.



El problema de utilizar IP en redes de sensores es que el coste alto tanto en tamaño de código, complejidad del protocolo y configuración requerida por las cabeceras / así como el coste general (*overhead*) que introduce el protocolo sobre los datos. También se elimina la necesidad de servidores de configuración (DHCP y NAT) mediante la utilización de *Zero-Conf* y descubrimiento de los vecinos de IPv6. Además, como se fundamenta el protocolo en IPv6 se puede definir una compresión de cabeceras *stateless* que permite la transmisión de paquetes IPv6 en paquetes tan pequeños como 6 bytes, de tal forma que los miedos relacionados con la cabecera IPv6 de 40 bytes pueden ser disipados mientras que al mismo tiempo se pueden aprovechar el inmenso número de direcciones que el espacio IPv6 provee. Ya que el protocolo IPv6 utiliza direcciones de 128bit opuestamente a IPv4 que utiliza direcciones de 32 bit. Con direcciones de 128 bit IPv6 es capaz de dar  $56E^{27}$  direcciones por persona, o  $667E^{21}$  direcciones por metro cuadrado en la tierra (Mulligan, 2007).

	<b>Zigbee</b>	<b>Zensys</b>	<b>6LoWPAN</b>
Code Size with mesh	40K to 60K	32K	22K
Code Size w/o mesh	Not Possible	Not Possible	12K
RAM requirements	8K	<2K	4K
Header Overhead	8 to 16 bytes	Proprietary	2 to 11 bytes
Network Size	~65K	232	$2^{64}$
RF Radio support	802.15.4	Proprietary	802.15.4 ++
Transport Layer	None	Proprietary	UDP/TCP
Mesh Network Support	Zigbee	Proprietary	Many
Internet Connectivity	Zigbee Gateway	Zensys Gateway	Bridge/Router

*Ilustración 25 - Comparación de la pila de protocolos de diversas tecnologías (fuente: Mulligan, 2007)*

Se ha escrito un documento en el que se especifican los métodos concretos de compresión de las cabeceras usados para adaptar IPv6 a las tramas 802.15.4. Aunque no era una meta original del grupo de trabajo crear o elegir un protocolo de red *mesh*, sin embargo, en su lugar querían definir un mecanismo de codificación que fuera de la capa OSI 2/3 (denominado *mesh under*) y agnóstico en cuanto a protocolo. El resultado es un concepto original en el que el coste de envío de paquetes se relaciona con el uso

que se le da al enlace de comunicación. El coste se refiere al gasto total que suponen las cabeceras y el procesamiento.

Así en lugar de establecer una sola cabecera monolítica como se hizo en IPv4 y en Zigbee, se utiliza una estrategia parecida a la que se aplica en IPv6, que es una cabecera apilada. De esta forma si un dispositivo está enviando paquetes cortos directamente a otro nodo, no provoca el gasto de campos de cabecera para enrutamiento *mesh* multisalto o la fragmentación, por ejemplo.

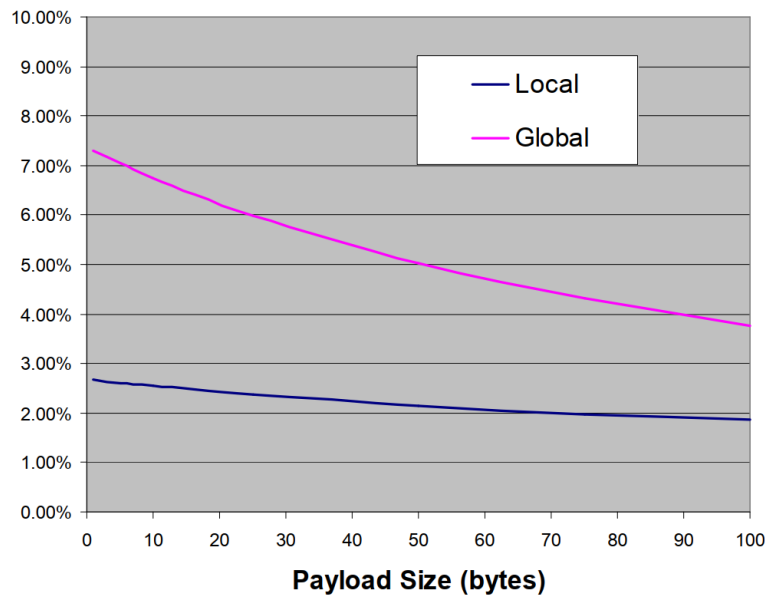
Hay cuatro tipos de cabeceras básicas definidas en el estándar: La cabecera de envío (*Dispatch header*), la cabecera *mesh*, la cabecera de fragmentación y la compresión de cabecera 1 (HC1). En el caso de uso más simple, solo se utiliza la *Dispatch header*, una HC1 y la cabecera IPv6 comprimida, cuyo total son unos esbeltos 6 bytes (48 bits). Únicamente cuando se envían grandes paquetes es necesario incluir una cabecera de fragmentación; de la misma manera solo cuando se está utilizando una red *mesh* multisalto subyacente a 6LoWPAN es necesario incluir la cabecera de enrutamiento *mesh*.

Así el coste técnico de implementación de 6LoWPAN es inferior o a lo sumo igual al de otros protocolos similares, y el coste generado por las cabeceras (*overhead*) para la mayoría de los paquetes comunes es muy inferior a otros protocolos. Además, y de forma incluso más relevante, este *overhead* reducido se traduce en ahorro energético, vital en dispositivos que operan con baterías o incluso pequeñas pilas de botón.

A pesar de que más del 60% de la energía que utilizan estos dispositivos se emplea esperando a que el microcontrolador y la radio se inicialicen, y más del 90% se derrocha escuchando el canal cuando no hay nada que oír, sigue siendo importante no ser derrochadores de la energía o ancho de banda disponibles. El *overhead* energético en 6LoWPAN representa desde el 2.8% para cargas útiles de datos pequeñas (menores a 10 bytes) hasta menos del 2% para cargas útiles de datos cercanos a la capacidad de la trama.

A continuación, se muestra un gráfico que compara los *overhead* locales y globales de transmisión. La diferencia entre paquetes locales y globales es la habilidad de comprimir o quitar la cabecera IPv6 de 128 bit para las transmisiones locales.

**Energy Overhead for 6LoWPAN Header**



*Ilustración 26 -Comparación de gasto energético adicional en cabeceras 6LoWPAN en paquetes locales y globales (fuente: Mulligan, 2007)*

## 2.2. SISTEMAS OPERATIVOS PARA DISPOSITIVOS MÓVILES Y EMBEBIDOS

### 2.2.1. Sistema operativo Android

El sistema operativo Android ofrece un marco de trabajo con un conjunto estandarizado de conceptos, prácticas y criterios que permite la creación de aplicaciones informáticas, conocidas comúnmente como *apps*, mayormente para teléfonos inteligentes, tabletas y otros dispositivos móviles.

Las aplicaciones se llevan a cabo en un entorno de lenguaje Java y el sistema ofrece una interfaz de programación de aplicaciones (API p.s.s. en inglés) que permite interactuar de forma segura con los recursos específicos del dispositivo.

Se caracteriza por que las aplicaciones proporcionan múltiples puntos de entrada, esto quiere decir que no existe una función principal o *main*. En cambio, las aplicaciones se compilan como una combinación de diferentes componentes que se pueden invocar de manera individual, esto significa que el código se puede reutilizar dentro del sistema en gran medida lo que favorece el funcionamiento en sistemas portátiles con recursos limitados.

Por ejemplo, si una aplicación requiere el uso de un mapa para mostrar información geográfica al usuario, no necesita su propia actividad y servicio de mapas, sino que puede utilizar las predeterminadas del sistema. Otro ejemplo es el uso de la cámara para obtener una imagen del entorno del dispositivo. Si una aplicación tiene esta capacidad, un componente de otra aplicación puede iniciarla y realizar la acción requerida mediante un procedimiento estandarizado conocido como *intent*. Esto es, en lugar de deber tener esta capacidad programada desde cero, de forma exclusiva y redundante.

Esto reduce significativamente el tamaño de los paquetes de aplicaciones, denominados APK, que el usuario puede descargar e instalar de un repositorio en función de sus necesidades.

Otra de las características del sistema operativo Android es que proporciona un marco de trabajo de aplicaciones adaptable que permite ofrecer a los usuarios recursos exclusivos en función de la configuración del dispositivo en el que se ejecute la *app*. Por ejemplo, mediante diferentes archivos de diseño de Lenguaje de Marcado Extensible (XML p.s.s. en inglés) se definen distintos tamaños de pantalla. De forma que el sistema determina que diseño aplicar en función del tamaño de pantalla del dispositivo actual (Hébuterne & Pérochon, 2014).

XML es un lenguaje de marcado de propósito general, lo que quiere decir que se utiliza para compartir datos a través de diferentes sistemas, como internet, y además que no está predefinido por lo que se pueden definir las etiquetas adecuadas para cada caso (Williamson, Moreno Blázquez, Moreno Díaz, & Sánchez Allende, 2001).

Además, si una aplicación requiere un componente de *hardware* específico, como una cámara, la aplicación puede averiguar durante el tiempo de ejecución si dicho componente está disponible el dispositivo. Pudiendo además impedirse la instalación de una aplicación en el caso de que el dispositivo no admita determinadas funciones. Evitando que el usuario tenga una mala experiencia con un software que es inadecuado para su dispositivo (Tomás Gironés, 2013).

La creación de una aplicación involucra dos procesos principales bien diferenciados, estos son el diseño de la interfaz gráfica de usuario, y la implementación de las funciones que lleva a cabo el programa. La interfaz de usuario se define mediante XML, en dicho lenguaje se definen las diferentes *vistas*. Estos son los elementos que se muestran en la pantalla, como texto, imágenes y botones. Para la definición de las funciones se utiliza java o el más recientemente implementado Kotlin. Ambos lenguajes son compatibles con la máquina virtual de Java, aunque el segundo tiene una verbosidad reducida que permite el desarrollo más ágil de las aplicaciones mediante una premisa



simple de menor cantidad de caracteres en los programas para realizar las mismas funciones. Debido al extenso rodaje de java, es más sencillo encontrar abundante documentación en este lenguaje, cuyo alcance además se extiende más allá del desarrollo de aplicaciones para Android.

### 2.2.2. Sistema operativo iOS

iOS es un sistema operativo propietario de Apple, diseñado para su uso en dispositivos móviles de la marca. En 2016 iOS era el segundo sistema operativo móvil más popular del mundo (Issitt, 2018). Después de Android.

Se introdujo en 2007, y fue uno de los primeros sistemas operativos móviles que incorporó un sistema de pantalla táctil de tipo capacitivo. La pantalla táctil permite que los usuarios activen funciones mediante toques en la pantalla con sus dedos.

El iOS de Apple estuvo también entre los primeros sistemas operativos en dale la posibilidad a sus usuarios de descargar aplicaciones en sus dispositivos móviles. iOS es por lo tanto una plataforma para cientos de miles de aplicaciones de terceros.

El primer iOS tenía algunas limitaciones. Por ejemplo, carecía de la capacidad para permitir la ejecución de aplicaciones de terceros, no tenía funciones de portapapeles y no podía adjuntar archivos en los emails.

Del mismo modo no estaba diseñado para ofrecer capacidades multitarea, forzando a los usuarios a esperar que finalizara un proceso para iniciar otro. Sin embargo, introdujo una sofisticada pantalla táctil capacitiva. Lo que permitía activar la mayoría de las funciones mediante toques en la pantalla en lugar del uso de botones.

Además, soportaba gestos multitáctiles, que ofrecen mediante el uso de dos o más dedos, activar funciones adicionales.

## 2.3. TÉCNICAS DE CONTROL DE MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA DE IMANES PERMANENTES

Un motor de Corriente Continua de Imanes permanentes (PMDCM p.s.s en inglés), es difícil y matemáticamente tedioso de controlar debido a sus propiedades de no linealidad. De hecho, un PMDCM está clasificado como un sistema de segundo orden.

Esto quiere decir que su función de transferencia, que relaciona la entrada de tensión eléctrica en la armadura con la salida de velocidad angular en el eje, es una ecuación diferencial de segundo orden. Dichos sistemas se caracterizan por presentar oscilaciones y sobre oscilaciones. Estos fenómenos deben ser tenidos en cuenta para el desarrollo de los sistemas de control (Hassan, Al-Shamaa, & Abdalla, 2017).

Cuando se trata de regular un sistema de este tipo, es común acudir a soluciones de tipo control PID. Estas son ubicuas en el control de motores industrial, debido sobre todo a que es una solución barata, robusta y que garantiza la operación deseada.

Lo que no garantiza un controlador PID por si mismo es la velocidad de operación deseada. Así se puede esperar obtener un sistema con sobre oscilaciones. En ciertos casos de uso estas sobre oscilaciones pueden no ser adecuadas.

Son los llamados sistemas de control robustos, capaces de rendir en un amplio rango de condiciones de operación. Lo que permite a los ingenieros operarlos de forma sencilla (Dorf & Bishop, 2005).

La solución es sintonizar el regulador PID, para obtener las mejores características posibles de sobre oscilación y tiempo de respuesta para alcanzar el régimen deseado de operación. Para llevar a cabo esta tarea hay diversos métodos. Se exponen los más representativos, tanto por su ubicuidad como por su carácter novedoso.



## 2.3.1. Algoritmos de control

### 2.3.1.1. Ziegler-Nichols

Dado que es común ajustar los controlares PID *in situ*, se han propuesto a lo largo de los años diversas técnicas de sintonización. Estas permiten realizar una sintonización precisa de los controladores PID. Del mismo modo se han desarrollado métodos automáticos e incluso muchos controladores PID comerciales incluyen capacidades de sintonización automática en directo.

De la misma manera existen versiones modificadas de controles PID como I-PD y controles PID de dos grados de libertad, están siendo usados actualmente en la industria. Así como numerosos métodos de amortiguación del cambio de operación manual a automática y de programación de las ganancias.

Como ya se ha comentado la utilidad de los sistemas PID está en su aplicabilidad generalizada a la mayoría de los sistemas. Es un hecho conocido que los esquemas de control PID, tanto básicos como modificados han dado resultados satisfactorios de control, aunque no siempre proveen la solución óptima en diferentes casos (Ogata, 2003).

Ziegler y Nichols propusieron reglas para determinar valores de la ganancia proporcional  $K_p$ , el tiempo integral  $T_i$  y el tiempo diferencial  $T_d$  fundamentándose en las características transitorias de una determinada planta. Dicha determinación de los parámetros PID puede ser llevada a cabo por ingenieros mediante experimentos en la propia planta.

Desde la proposición de Ziegler-Nichols ha habido numerosas propuestas para reglas de sintonización de controladores PID. Sin embargo, debido a sus características se presenta a menudo como referencia en la literatura.

Existen dos métodos llamados reglas de sintonización de Ziegler-Nichols. Ambas quieren obtener una sobre oscilación máxima del 25% en la respuesta al escalón unitario.

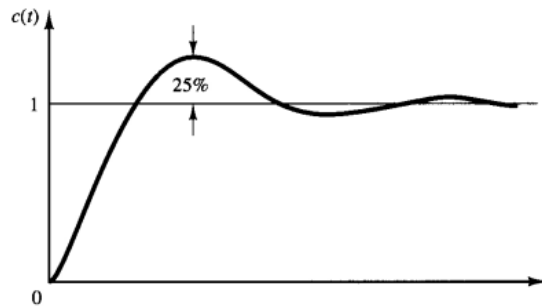


Ilustración 27 - Ilustración de la sobre oscilación del 25%. fuente: (Ogata, 2003)

**Primer método.**

Se obtiene experimentalmente la respuesta al escalón unitario de la planta.

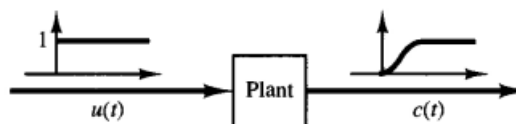


Ilustración 28 - Obtención de la respuesta al escalón unitario del sistema. fuente: (Ogata, 2003)

Si el sistema no tiene integradores ni polos complejos conjugados dominantes. La respuesta al escalón unitario será como una especie de S.

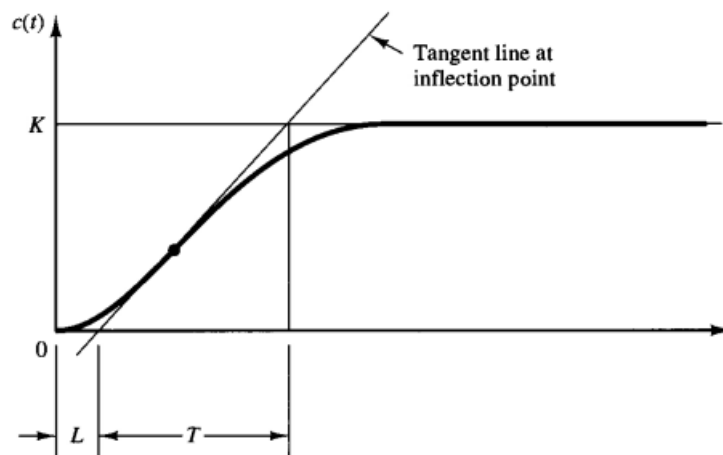


Ilustración 29 - Aspecto de la respuesta al escalón unitario de un sistema sin integradores ni polos compuestos conjugados. fuente: (Ogata, 2003)

Por lo tanto, si la curva no exhibe este aspecto este método no se aplica. Las curvas pueden ser generadas de manera experimental, o mediante una simulación dinámica del sistema.

La curva puede ser caracterizada mediante los parámetros retardo  $L$  y la constante  $T$ . Ambos se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva en cuestión y localizando, a continuación, las intersecciones con el eje de tiempo y la línea  $c(t) = K$ . La función de transferencia puede ser aproximada por un sistema de primer orden con un retardo de transporte de la siguiente manera:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$

*Ilustración 30 - Función de transferencia aproximada por un sistema de primer orden.*

Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  de acuerdo a las fórmulas siguientes:

Type of Controller	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

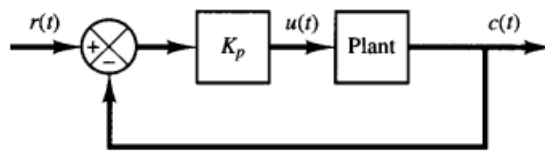
$$\begin{aligned} G_c(s) &= K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\ &= 1.2 \frac{T}{L} \left( 1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) \\ &= 0.6T \frac{\left( s + \frac{1}{L} \right)^2}{s} \end{aligned}$$

*Ilustración 31 - Regla de sintonización de Ziegler-Nichols fundamentada en la respuesta al escalón unitario de la planta. fuente: (Ogata, 2003)*

De esta forma el controlador PID tiene un polo en el origen y ceros dobles en  $s = -1/L$ .

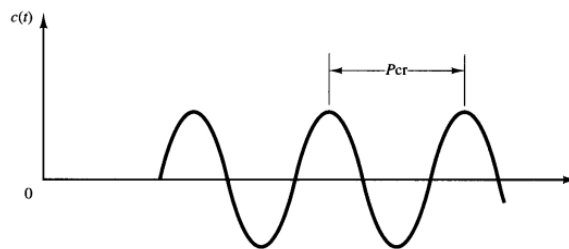
### Segundo método.

En el segundo método establecemos  $T_i = \infty$  y  $T_d = 0$ . Utilizando de esta manera únicamente la acción de control proporcional.



*Ilustración 32 - Sistema en lazo cerrado con control proporcional. fuente: (Ogata, 2003)*

Se incrementa la  $K_p$  de 0 al valor crítico  $K_{cr}$  donde la salida exhibe por primera vez oscilaciones sostenidas en el tiempo. Si el sistema no exhibe oscilaciones sostenidas para ningún valor de  $K$  este método no se aplica.



*Ilustración 33 - Periodo crítico asociado al parámetro  $K_p$  crítico ( $K_{cr}$ ). fuente: (Ogata, 2003)*

Por tanto, la ganancia crítica  $K_{cr}$  y el correspondiente valor  $P_{cr}$  son determinados de forma experimental. Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  de acuerdo con la formula siguiente:

Type of Controller	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Notice that the PID controller tuned by the second method of Ziegler–Nichols rules gives

$$\begin{aligned}
 G_c(s) &= K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\
 &= 0.6K_{cr} \left( 1 + \frac{1}{0.5P_{cr}s} + 0.125 P_{cr}s \right) \\
 &= 0.075K_{cr}P_{cr} \frac{\left( s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s}
 \end{aligned}$$

*Ilustración 34 - Regla de sintonización de Ziegler-Nichols fundamentada en la ganancia crítica  $K_{cr}$  y el periodo crítico  $P_{cr}$ . fuente: (Ogata, 2003)*

Por lo tanto, el controlador PID tiene un polo en el origen y ceros dobles en  $s = -4/P_{cr}$ .

Las reglas de sintonización de Ziegler-Nichols, entre otras, han sido ampliamente utilizadas para sintonizar controladores PID en sistemas de control de procesos en los que la dinámica de la planta no se conoce con exactitud.

A lo largo de los años, dichas reglas de sintonización han demostrado ser muy útiles. Las reglas de Ziegler-Nichols se pueden, por supuesto, aplicar a dinámicas de planta que son conocidas. Para ello hay numerosas aproximaciones analíticas y gráficas para el diseño de controladores PID.

Cuando la dinámica de la planta es conocida, la respuesta al escalón unitaria puede ser calculada, así como la ganancia crítica  $K_{cr}$  y el periodo crítico  $P_{cr}$ . Entonces dados los valores calculados es posible determinar los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ , como se ha explicado en las tablas.

Sin embargo la utilidad de Ziegler-Nichols se vuelve aparente cuando las dinámicas de planta no son conocidas, y por tanto los métodos analíticos y gráficos no están disponibles para el diseño de los controladores.

También generalmente para plantas con dinámicas complicadas, aunque sin integradores, el método de Ziegler-Nichols puede ser aplicado. Sin embargo, en casos que contienen integradores estas reglas pueden no ser efectivas. A continuación, se ilustra con un ejemplo:

Suponiendo que la función de transferencia de un sistema con realimentación unitaria es:

$$G(s) = \frac{(s + 2)(s + 3)}{s(s + 1)(s + 5)}$$

Debido a la presencia de un integrador, no se puede aplicar el primer método. Ya que no va a tener una curva de respuesta con forma de S; en su lugar la respuesta se incrementa con el tiempo. De la misma forma si se intenta aplicar el segundo método, el sistema de bucle cerrado con un controlador proporcional no va a exhibir oscilaciones periódicas para ningún valor de ganancia  $K_p$ . Esto se puede ver en el siguiente análisis:

$$s(s + 1)(s + 5) + K_p(s + 2)(s + 3) = 0$$

O también:

$$s^3 + (6 + K_p)s^2 + (5 + 5K_p)s + 6K_p = 0$$

De tal manera que la matriz de Routh que se obtiene es:

$$\begin{array}{ccc}
 s^3 & 1 & 5 + 5K_p \\
 s^2 & 6 + K_p & 6K_p \\
 s^1 & \frac{30 + 29K_p + 5K_p^2}{6 + K_p} & 0 \\
 s^0 & 6K_p & 
 \end{array}$$

Los coeficientes de la primera columna son positivos para todos los valores positivos de  $K_p$ . Por tanto, en este caso el sistema en bucle cerrado no va a exhibir

oscilaciones sostenidas en el tiempo y por lo tanto el valor de ganancia crítica  $K_r$  no existe. Por ello, el segundo método tampoco es aplicable.

Si el método de Ziegler-Nichols es aplicable, entonces la planta con un controlador PID sintonizado con las reglas de Ziegler-Nichols va a manifestar aproximadamente del 10-60% de sobre oscilación en la respuesta al escalón unitario. Aunque la experimentación en diversas plantas revela que de media se producirá una sobre oscilación máxima de aproximadamente el 25%, ya que los valores propuestos en las tablas están fundamentados en la media.

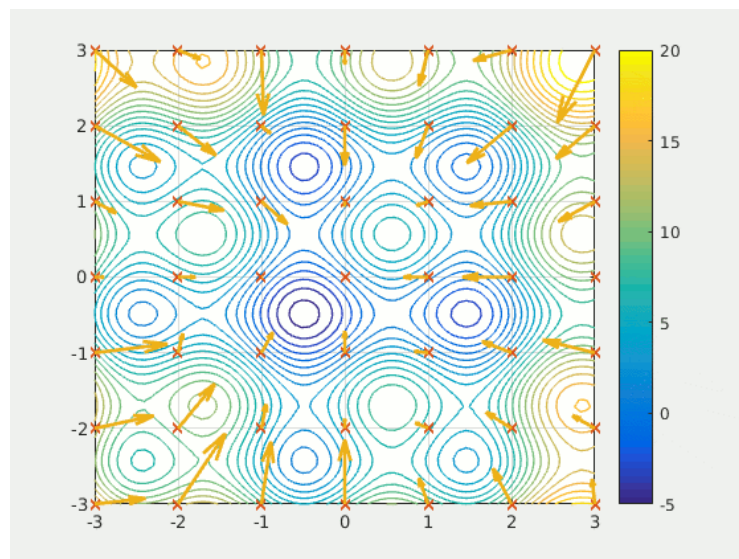
Para cualquier caso, si la sobre oscilación máxima es excesiva, siempre es posible realizar un ajuste delicado para que el sistema en bucle cerrado manifieste respuestas transitorias satisfactorias.

En cualquier caso, el método de Ziegler-Nichols provee una suposición culta de los valores de los parámetros, dando un punto de partida para un posterior ajuste más sutil.

### 2.3.1.2. Optimización por enjambre de partículas (PSO – "Particle Swarm Optimization")

El afinado convencional de las ganancias de un controlador PID, como por ejemplo el método de Ziegler-Nichols, produce grandes sobre oscilaciones. Una posible solución, dados los medios computacionales de hoy en día, es el uso de la optimización por enjambre de partículas (PSO p.s.s en inglés).

En ciencias de la computación, el PSO es un método que optimiza un problema haciendo intentos iterativos de mejora de la solución candidata relativa a una medida de calidad. Por lo tanto, resuelve un problema mediante una población de soluciones candidatas a las que se llama partículas, y cuyo movimiento por el campo de búsqueda, y acorde a relaciones matemáticas simples se determina en posición y velocidad.



*Ilustración 35 - PSO representación gráfica de un procedimiento de optimización por enjambre - By Ephramac - Own work, CC BY-SA 4.0.*

Además, el movimiento de cada partícula está influenciado por su mejor posición local conocida, y a su vez es guiada hacia las mejores posiciones conocidas en el espacio de búsqueda. Estas últimas son actualizadas a medida que nuevas y mejores posiciones son encontradas por otras partículas. Dicho procedimiento se espera que mueva el enjambre hacia las mejores soluciones (Kennedy & Eberhart, 1995).



Este método, originalmente atribuido a Kennedy, Eberhart y Shi, fue inicialmente pensado para la simulación del comportamiento social, como una representación estilizada del movimiento de los pájaros en bandadas y los bancos de peces. Sin embargo, más tarde se simplificó el algoritmo de tal manera que se observó que era optimizador del rendimiento (Shi & Eberhart, 1998).

Más recientemente se ha hecho una revisión exhaustiva de los trabajos tanto teóricos como experimentales en PSO (Bonyadi & Michalewicz, 2017). El PSO es lo que se llama un método metaheurístico, lo que quiere decir que es un procedimiento, que busca un procedimiento eficaz para generar una solución. Es decir, se intenta optimizar una solución genérica para un tipo de problema.

Se trata de un procedimiento de alto nivel que se diseña para encontrar, generar o seleccionar un algoritmo que podría proporcionar una solución suficientemente buena a un problema de optimización. Especialmente en el caso de tener información incompleta o imperfecta, o debido a las restricciones en capacidad de computación.

Se muestrea un número grande de soluciones, ya que el número total de estas puede ser muy grande. Además, se realizan una serie de suposiciones acerca del problema de optimización de tal manera que se pueden utilizar en una variedad de problemas. Sin embargo, en relación con los algoritmos de optimización y los métodos iterativos, los procedimientos de este tipo no garantizan encontrar una solución globalmente óptima para algunas clases de problemas.

Algunos métodos metaheurísticos se complementan con alguna forma de optimización estocástica de tal manera que la solución encontrada depende de variables aleatorias generadas. Así mediante la optimización combinatoria, buscando en un gran conjunto de soluciones factibles, es posible encontrar buenas soluciones con menor esfuerzo de computación que los algoritmos de computación, los métodos iterativos o la heurística simple.

Cabe destacar que se trata de un campo experimental de las ciencias de la computación, y como tal describe resultados empíricos fundamentados en experimentos computacionales con los algoritmos. Aunque también es cierto que existen resultados teóricos formales, especialmente en convergencia y la posibilidad de encontrar el óptimo global.

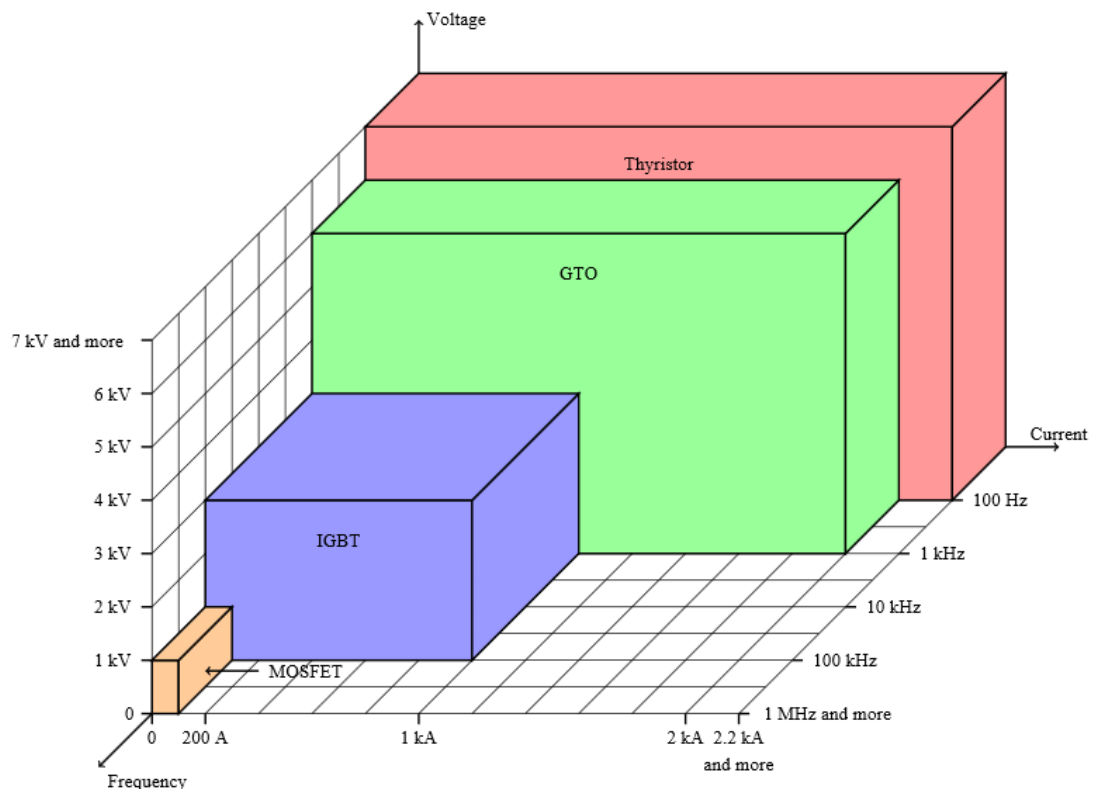
Cabe destacar que el PSO no utiliza el gradiente del problema que está siendo optimizado, lo que significa que no es necesario que el problema sea diferenciable para que el PSO lo resuelva. A diferencia de los métodos tradicionales de optimización, como el descenso del gradiente y los métodos casi-newtonianos.

Es importante tener en cuenta que la selección de los parámetros puede tener un gran impacto en el rendimiento de la optimización. Por lo tanto, la selección de parámetros para el PSO que dan buenos resultados ha sido sujeto intensivo de estudio. Además, existen ya parámetros afinados para diversos escenarios de optimización.

Ha sido aplicado con éxito a problemas tales como el entrenamiento de redes neuronales artificiales, optimización de funciones, control difuso y clasificación de patrones por nombrar algunos. Debido a su facilidad de implementación y convergencia rápida hacia soluciones aceptables ha recibido amplia atención en los últimos años (Bonyadi & Michalewicz, 2017).

### 2.3.1. Electrónica de potencia

Desde el punto de vista del hardware, el control del motor se lleva a cabo mediante el uso de una señal de PWM que se modula siguiendo los métodos mencionados más arriba, y que se llevan a la realidad mediante interruptores estáticos. Dichos interruptores estáticos deben ser escogidos en función de las características de potencia y frecuencia de conmutación requeridas.



*Ilustración 36 - Dominio de aplicación de los diferentes tipos de interruptores estáticos según tensión, corriente y frecuencia de conmutación.*

En función de las potencias y frecuencias de conmutación que se manejan en el sistema podría parecer coherente el uso de interruptores de tipo IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) para la conmutación del motor de tracción de la cinta ergométrica ya que la potencia se encuentra por debajo de 2kW y la frecuencia de conmutación es del orden de las decenas de kHz. Como se observa en el diagrama anterior es el orden de trabajo nominal de un transistor de potencia IGBT. Para potencias más reducidas sería concebible usar MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor) con capacidad para conmutar a frecuencias mucho mayores, lo que permitiría muestreos

más elevados y por lo tanto mayor fidelidad en la reproducción de la señal de control producida por los mecanismos comentados con anterioridad.

Basta con conmutar una de las líneas que se dirigen al motor, siempre y cuando se provea una masa con una impedancia suficientemente baja para que no dé problemas y se acerque al modelo ideal. Recordando que siempre la corriente eléctrica tenderá a circular por el camino con menor resistencia, y en su caso inductancia y capacidad. El método de conmutación será el descrito anteriormente mediante una modulación PWM y el algoritmo de optimización.

El circuito de conmutación de potencia requiere de circuitos supletorios de filtro, regulación de tensión, control y alimentación. De tal manera que las señales lleguen con integridad a los puntos de destino, que permite el funcionamiento correcto del sistema.

## 2.4. HERRAMIENTAS DE DESARROLLO DE SOFTWARE

### 2.4.1. *Software para el desarrollo de aplicaciones en Android*

Las aplicaciones de Android se pueden desarrollar mediante el conjunto de herramientas oficiales. Al estar pensadas específicamente para dicha tarea facilitan algunos aspectos prácticos del desarrollo de aplicaciones para la plataforma en cuestión.



*Ilustración 37 - Logotipo Android: "El robot de Android se reproduce o modifica a partir del trabajo generado y compartido por Google, y se usa conforme a lo descrito en la Licencia de Atribución de Creative Commons 3.0".*

Una aplicación, y en general cualquier sistema de software se desarrolla desde lo que se conoce como IDE que son las siglas en inglés de entorno de desarrollo integrado (Integrated Development Environment) que tal y como su nombre indica, es un marco de trabajo que incluye muchas de las características necesarias para completar un trabajo concreto en la plataforma. Como veremos más adelante se utilizan diferentes IDEs para diferentes plataformas, aunque sería posible llevar a cabo la tarea, de forma mucho más tediosa, desde cualquier editor de texto plano (Sommerville, 2016).

Por lo tanto, el IDE es un facilitador de la ejecución de la tarea de desarrollo, que ahorra tiempo y evita ciertos errores. El IDE oficial de Android se conoce como Android Studio, y está basado a su vez en otro IDE más generalista que se denomina IntelliJ



IDEA. Este último soporta una variedad de lenguajes, especialmente los relacionados con el desarrollo de servicios WEB y aplicaciones móviles. Entre los que se incluyen Java y Kotlin.

Un IDE tiene lo que se conoce como alcance, que es fundamentalmente el subconjunto de archivos, paquetes y/o directorios de un proyecto. Es decir, es posible tratar diferentes tipos de archivos con un IDE, y además limitar el alcance de ciertas operaciones como la búsqueda, o la inspección de código por nombrar algunas. De la misma forma se pueden configurar las diferentes ayudas como el resaltado en color del código en función del alcance y los archivos que se estén manejando. Los alcances son tanto más útiles cuanto mayor sea la magnitud de un proyecto.

### 2.4.1.1. *Android SDK*

El kit de desarrollo software (SDK) es la agrupación de herramientas para la generación de código oficial del sistema Android. Permite al codificador construir aplicaciones para este sistema en particular.

Está distribuido por Google, e incluye herramientas como un sistema de depuración de código, así como bibliotecas para facilitar la compatibilidad de las distintas versiones, un emulador de dispositivos virtuales Android (ADV Manager), así como las herramientas para interactuar con dispositivos físicos, entre otras.

### 2.4.1.2. *Eclipse*

Se trata de un marco de trabajo que proporciona herramientas de gestión del entorno de desarrollo, la introducción de código, así como la depuración, ejecución y despliegue de aplicaciones.

Destaca por su flexibilidad en la configuración de la interfaz para las diferentes fases del proceso, las facilidades para la gestión de proyectos, su potente depurador de código y la gran colección de extensiones disponibles.

### 2.4.1.3. *inteliJ IDEA*

Entorno de desarrollo integrado (IDE) para la codificación de software, desarrollado por JetBrains.

Proporciona características similares a Eclipse incluyendo: análisis de código, compilación, ejecución, depuración, control de versiones, detección de duplicaciones, análisis de dependencias y soporte para extensiones.

## 2.4.2. Plataforma Arduino

### 2.4.2.1. ARDUINO IDE

El entorno de desarrollo integrado de Arduino es una aplicación multiplataforma (Windows, macOS, Linux) que está desarrollada en funciones de C y C++. Se utiliza para escribir y subir programas a placas compatibles con Arduino. También con la ayuda de extensiones de terceros, permite el uso de placas de otros fabricantes.



```
Blink | Arduino 1.8.5

This example code is in the public domain.

http://www.arduino.cc/en/Tutorial/Blink
*/

// the setup function runs once when you press reset or power the board
void setup() {
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {$
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000); // wait for a second
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000); // wait for a second
}

32 Arduino/Genuino Uno on COM1
```

*Ilustración 38 - Interfaz gráfica de usuario del Arduino IDE en su versión para macOS.*

El código fuente del IDE es publicado bajo la licencia *GNU General Public License* versión 2. Además, soporta los lenguajes C y C++ utilizando algunas reglas y estructuración del código especiales.



El IDE de Arduino provee bibliotecas del proyecto *Wiring*, lo que provee diversos tipos de procedimientos de entradas y salidas comunes.

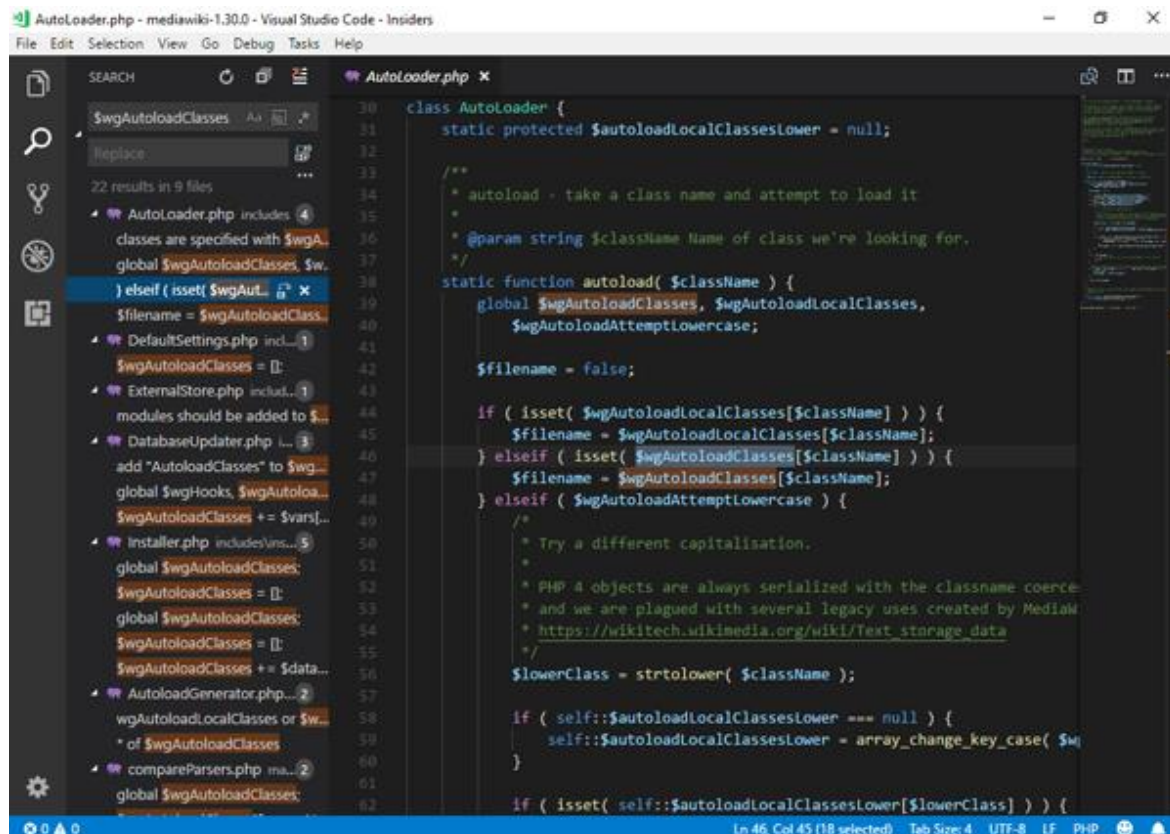
El código escrito por los usuarios solo requiere dos funciones básicas, para comenzar el *sketch*, nombre que reciben los programas de Arduino. Estos son compilados y enlazados con un programa *main()* que se introduce en un programa de ejecutiva cíclica dentro de la *GNU toolchain* una serie de herramientas que se usan de forma secuencial en la generación de código, y que también se distribuye con el IDE (Reyes Cortés & Cid Monjaraz, 2015).

El IDE utiliza el programa *avrdude* para convertir el código ejecutable en un archivo de texto en codificación hexadecimal, que posteriormente se carga en la placa Arduino mediante un programa cargador que se encuentra en el *firmware* de la placa.

En octubre de 2019 la organización de Arduino ha comenzado de dar acceso temprano a una nueva herramienta denominada Arduino PRO IDE que incluye capacidades de depuración y otras características avanzadas.

### 2.4.2.2. VISUAL STUDIO CODE

Es un editor de código fuente desarrollado por Microsoft para Windows, Linux y macOS. Incluye soporte para tareas de depuración, Git incorporado, así como resaltado de sintaxis, compleción inteligente del código y soporte para *snippets* y *refactoring* de código.



*Ilustración 39 - Interfaz gráfica de usuario de Visual Studio Code. Fuente (WP:N FCC#4), Fair use.*

Es altamente personalizable, lo que permite a los usuarios cambiar el aspecto, los atajos de teclado, las preferencias, así como instalar extensiones que añadan funcionalidades.

El código fuente de la herramienta es abierto y se publica bajo una licencia *MIT*.

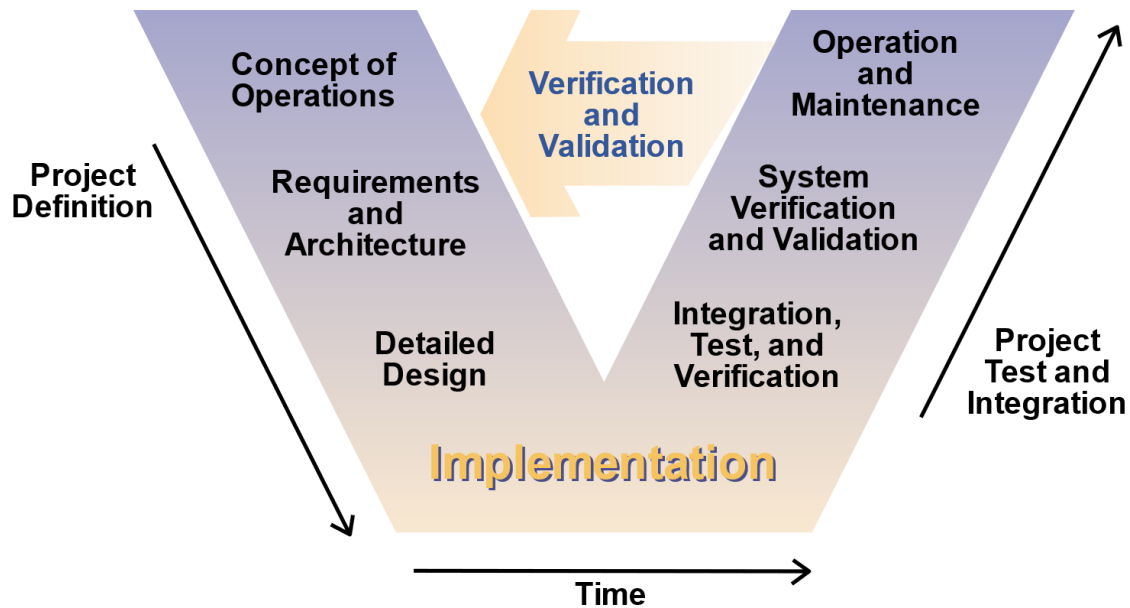
Visual Studio Code está fundamentado en Electron, un marco de trabajo que se utiliza para desplegar aplicaciones de Node.js para el escritorio corriendo sobre el *Blink layout engine*.

A pesar de que utiliza el marco de trabajo Electron, el programa no utiliza Atom, y en su lugar emplea el mismo elemento editor (nombre en clave "Monaco") que utiliza la herramienta de Microsoft Azure DevOps.

En 2019 una encuesta con más de 87 mil participantes reveló que es el entorno de desarrollo más popular con un 50.7% de los participantes afirmando que lo utilizan.

### 3. DESARROLLO

Para llevar a cabo los diferentes desarrollos, se aplica un *modelo en V* con tantos niveles como se considere necesario en función de la actividad y objetivos que se quiere alcanzar.



*Ilustración 40 - Método de trabajo en V para el desarrollo de proyectos.*

Este diagrama ilustra de forma excepcional el carácter iterativo del proceso de desarrollo de un proyecto. Desde el concepto hasta la operación y mantenimiento pasando por los ciclos necesarios de verificación y validación. También se aprecia la transición suave entre las diferentes fases a lo largo del tiempo, indicando que, aunque cuentan con un principio y un fin la frontera entre ellos no siempre está especialmente bien definida.

Asimismo, asume tasas de progreso lineales, lo que en la realidad es difícil de trasladar debido al gran número de imprevistos y factores extrínsecos al proyecto que ejercen influencia sobre él. Aunque da un ideal al que aspirar y que motiva a aplicar las medidas necesarias para asimilar la velocidad de avance del proyecto a una constante en el tiempo.

### 3.1. RESTAURACIÓN

Siguiendo los objetivos propuestos, en primer lugar, es necesario estudiar el estado de la máquina al inicio del proyecto tal y como se recibe. Mediante la aplicación de una metodología iterativa y una investigación de los procesos involucrados se quiere esclarecer las causas que provocan que el dispositivo no cumpla correctamente con la función para la que fue producido.

El proyecto se genera a partir de la inquietud de la organización ADISPAZ de recuperar el estado funcional de la cinta ergométrica que disponen para hacer fisioterapia de la marcha. La máquina no es capaz de controlar la velocidad de giro de la cinta, lo que impide su uso en prácticamente cualquier caso, especialmente en el entorno de la rehabilitación. Por lo que plantean si cabe la posibilidad de restaurarla.



*Ilustración 41 - Cinta ergométrica utilizada para cinesioterapia de la marcha de ADISPAZ.*

Cuando se recibe el dispositivo se comprueba su estado, especialmente el de la avería. Esta se manifiesta al ordenar la operación del aparato, ya que tras alimentarlo y gestionar el inicio la marcha, en lugar de hacerlo de manera progresiva este se produce violentamente.

Rápidamente alcanza un régimen estacionario a velocidad elevada. Dicho régimen impide el uso de la máquina como dispositivo deportivo, ya que la mayoría de los protocolos de ejercicio incluyen fases iniciales en las que se indica un esfuerzo menor. Del mismo modo muchos protocolos de cinesioterapia de la marcha se llevan a cabo más despacio que la velocidad proporcionada por el sistema.

Cabe destacar que la máquina no responde a las órdenes de cambio de velocidad con la respectiva variación de la frecuencia angular del motor. Sin embargo, sí que emite avisos acústicos indicando que ha registrado satisfactoriamente la pulsación.

Para alcanzar los objetivos es necesario realizar una serie de pasos secuenciales. En primer lugar, se conocerían los mecanismos que se han dispuesto en el sistema para que su funcionamiento sea el adecuado. A continuación, se detectarían el/los componentes averiados. Se estudiarían las causas que provocan dicha avería, y por último se buscaría una manera de mitigarlas.

Se comienza con un estudio de los procesos que se producen en una cinta ergométrica para provocar la actividad e impacto deseados en el usuario. Y, en este caso, donde dichos procesos no se comportan de la manera esperada.

Se hace un análisis de los requisitos y especificaciones de la máquina en su estado original de producción. Este estudio permite determinar las expectativas impuestas sobre el dispositivo y su capacidad y grado para cumplirlas.

A continuación, se lleva a cabo un análisis funcional, más detallado, en el que se trata cada componente como una caja negra y se estudian las relaciones entre ellos. En este examen se obtiene una visión global del sistema, que permite llevar a cabo descomposiciones posteriores de forma más rigurosa y ordenada.

El paso siguiente es estudiar la arquitectura del sistema, en este caso haciendo observaciones sobre el funcionamiento de cada uno de los componentes. Es el más detallado de los análisis. El enfoque de este análisis, de bajo nivel, es el detalle de funcionamiento de cada uno de los componentes, estudiando hasta donde sea relevante para la cuestión a tratar. En esta observación se adquiere conocimiento detallado del funcionamiento de los diferentes componentes del sistema.

Más tarde, si procede, se realizaría la fase de implementación. En esta fase del proceso se desarrollan las soluciones y componentes unitarios que forman el sistema y la posible solución de su avería. En este proceso se tienen en cuenta los requisitos y especificaciones, así como la investigación funcional y de arquitectura del sistema para producir un desarrollo idóneo.

### 3.1.1. Análisis de requisitos y especificaciones

Una cinta ergométrica es un dispositivo que provee una superficie que se mueve en sentido contrario a la marcha. Así al caminar sobre dicha superficie se pueden obtener las respuestas fisiológicas propias de recorrer grandes distancias sin desplazarse de una habitación. Además, tiene ventajas como la disponibilidad del ejercicio independientemente de las condiciones climatológicas y la facilidad para adaptar el ejercicio al usuario, así como la capacidad de tomar medidas precisas y con equipamiento estacionario.



*Ilustración 42 - Muestra la cinta ergométrica al inicio del estudio.*

Por lo tanto, en el entorno del ejercicio aeróbico y la rehabilitación una cinta ergométrica debe soportar los esfuerzos y solicitudes producidos por un ser humano adulto mientras se ejercita. Proporcionando una estructura con características mecánicas adecuadas tales como rigidez e inercia geométrica. Dicha estructura debe asumir las solicitudes provocadas por el ejercicio. Además, debe ser económicamente

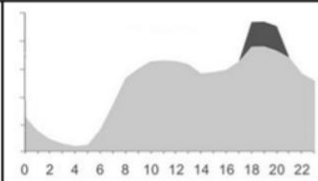
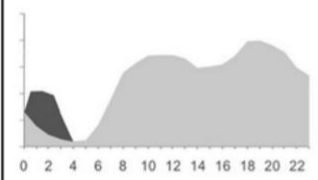
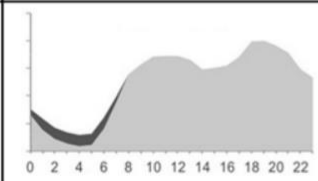
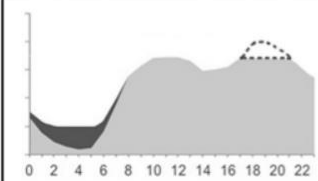


viable para su producción en masa, incluyendo las técnicas y procesos de fabricación empleados. De la misma manera ha de ser estéticamente agradable, para ser atractiva en el mercado e integrarse más fácilmente en los espacios en los que se destina su uso, contribuyendo a que dichos espacios sean agradables de habitar.

El dispositivo debe disipar potencia mecánica suficiente para vencer su resistencia intrínseca, así como la ejercida por el usuario. Para dicha tarea se pueden emplear fuentes de energía muy diversas. La red eléctrica es una buena opción, dada la ubicuidad de esta y el orden de magnitud de la potencia requerida. Por eso es muy común que las cintas ergométricas obtengan la potencia para su funcionamiento de la red de corriente alterna.

En la mayoría de los países europeos la potencia monofásica en enchufes comunes alcanza los 3.7 kW, *id est* 230V y 16 A. Sin embargo, hay otros países europeos con menor potencia como Reino Unido (230 V y 13 A) y Suiza (230 V y 10 A). En el caso de conexiones trifásicas la potencia excede la de un enchufe común, aunque puede estar disponible en zonas residenciales y comerciales también. Dependiendo del sistema de distribución de cada país la potencia suministrable es de 10-20 kW (García-Villalobos, Zamora, San Martín, Asensio, & Aperribay, 2014).

Las cintas ergométricas para ejercicio por lo general utilizan una cantidad de potencia inferior a las descritas de 1.5-2.5 kW. Por lo tanto, es posible que operen con energía eléctrica. Cabe la posibilidad de hacer un uso inteligente de la red, con el advenimiento de tecnologías más asequibles de batería y el bajo coste de los dispositivos inteligentes y conectados, e.g. la cinta puede evitar consumir picos de corriente de arranque en horas punta de la red eléctrica, contribuyendo a homogeneizar el consumo de energía eléctrica a lo largo del día en la red.

	Advantages	Drawbacks
	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Easy implementation</li> <li>✓ User friendly</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Overload of transformers and lines</li> <li>× Voltage deviations</li> <li>× Peak power increase</li> <li>× Increase of electricity CO<sub>2</sub> intensity</li> <li>× Electricity cost increase</li> <li>× Needs to reinforce the grid</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Easy implementation</li> <li>✓ Demand profile flattened</li> <li>✓ Better integration of wind energy at off-peak hours</li> <li>✓ Delay in grid investments</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Imbalances due to rapid increase of power consumed by PEVs</li> <li>× Possible overload of transformers and lines</li> <li>× Possible voltage deviations</li> <li>× Willingness of the customer required</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ancillary services provision</li> <li>✓ Demand profile flattened</li> <li>✓ Better integration of wind energy at off-peak hours</li> <li>✓ Delay in grid investments</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Complex implementation</li> <li>× ICT technologies required</li> <li>× Willingness of the customer required</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ancillary services provision</li> <li>✓ Peak power reduction</li> <li>✓ Optimal integration of intermittent RES</li> <li>✓ Reduction of electricity CO<sub>2</sub> intensity</li> <li>✓ Less investments in network reinforcements</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Very complex implementation</li> <li>× ICT technologies required</li> <li>× Willingness of the customer required</li> <li>× Premature degradation of batteries resulting of using V2G</li> <li>× Energy losses in grid-battery-grid transmissions</li> </ul>

*Ilustración 43 - Diferentes perfiles de consumo de red cuando se introducen capacidades de consumo demorado de la energía en los dispositivos mediante baterías y condensadores (fuente: García-Villalobos et al, 2014).*

También es necesario que dicha liberación de potencia sea controlada, para que se pueda variar la intensidad del ejercicio en función de las necesidades. En el caso de la utilización de energía eléctrica es una tarea asequible, ya que existen mecanismos sofisticados para el control preciso del flujo de grandes cantidades de electrones. El campo de estudio de este tipo de dispositivos se conoce como electrónica de potencia. Se estudian una serie de fenómenos derivados del movimiento de grandes cantidades de electrones que lo hacen diferir de la electrónica de señal.

La velocidad de avance debe ser estable, lo que permite que el usuario se pueda adaptar a la cadencia impuesta por el dispositivo, cuando esta es irregular la elevada carga mental provocada y el riesgo percibido por el usuario convierten la experiencia en menos agradable y en casos extremos intolerable.

La estabilidad del sistema es una combinación de un adecuado diseño mecánico y eléctrico que garantice un ciclo de funcionamiento homogéneo en el tiempo. De forma

que el sistema sea inherentemente afable. Además, debe existir un lazo de control en bucle abierto o cerrado que permita compensar las irregularidades introducidas por las vicisitudes introducidas en el sistema por el usuario, a veces favorables y en muchos casos desfavorables para el funcionamiento estable y suave.

### *3.1.2. Análisis funcional*

Una cinta ergométrica tiene una entrada de potencia que convierte mediante un propulsor mecánico en el avance continuo e indefinido de una plataforma que se mueve en dirección contraria al avance de su usuario. Este movimiento provoca que el usuario deba responder con un avance igual y de sentido contrario para mantenerse sobre la plataforma. Además, un dispositivo de este tipo provee un entorno favorable para la práctica deportiva de la marcha o carrera.

Cuenta con asideros para permitir a las personas con dificultades en la marcha sujetarse continuamente mientras practican. Lo que en otros escenarios requiere el uso de accesorios externos como bastones, muletas y andadores. La cinta cuenta con indicadores que miden de forma precisa el tiempo y velocidad del ejercicio.

En el apartado de instrumentación hay modelos que incluyen medidores de parámetros biológicos como el ritmo cardiaco. Este parámetro se puede medir mediante diferentes técnicas como la bioimpedancia o la fotopleletismografía (Bathilde, Then, Chameera, Tay, & Zaidel, 2018).

Conocer el ritmo cardiaco es un buen parámetro indicador del tipo de trabajo que se está realizando. Las células musculares, como las demás, tienen diversas rutas metabólicas de las que pueden extraer energía cuando la necesitan. Utilizarán una u otra en función de los nutrientes disponibles y el aporte de oxígeno.

Cuando el aporte de oxígeno en un ejercicio cardiovascular es suficiente se dice que el ejercicio es de tipo aeróbico. En caso de que la intensidad del ejercicio sea más alta el aporte de oxígeno se vuelve insuficiente y el ejercicio se torna anaeróbico. En ambos casos se están trabajando cualidades diferentes del rendimiento deportivo.

Una forma sencilla de distinguirlas es si el deportista puede mantener una conversación mientras practica (zona aeróbica). Con una medición suficientemente precisa se pueden ajustar los protocolos de ejercicio al progreso real del deportista

consiguiendo los máximos beneficios en el tiempo más corto posible. Aumenta la eficacia del entrenamiento.

Además, con algunos datos de talla, peso, edad y sexo se pueden hacer inferencias razonables de la cantidad de energía que el usuario está consumiendo para realizar el ejercicio. Y mostrarlos en tiempo real mientras se realiza la actividad física.

### *3.1.3. Arquitectura del sistema*

#### *3.1.3.1. Apartado mecánico*

Se hace uso de principios rudimentarios junto con materiales con propiedades muy buenas y coste viable. Para generar un dispositivo que cumpla las especificaciones requeridas.

La estructura, que soporta las solicitaciones propias del ejercicio, se realiza en materiales con alta resistencia y la geometría se estudia para hacer un compromiso entre obtener buenas características inerciales en los ejes principales de trabajo y respetar una estética agradable. Todo esto teniendo en cuenta que es un bien producido en masa por lo que los materiales y procesos empleados ha de ser factibles.

El chasis se fabrica con perfiles de acero que se unen entre ellos con soldaduras. En aquellas zonas en las que se requiere la capacidad de desmontaje, para el transporte o inspección, por ejemplo, se ha utilizado tornillería adecuada al esfuerzo requerido.

La banda de rodadura debe soportar las diversas solicitaciones a las que está sometida en su uso regular. Ser antideslizante por la cara externa para hacer contacto de forma adecuada con la suela del calzado del usuario. Evitando que este se resbale accidentalmente.

Sin embargo, por la cara interna es necesaria la propiedad contraria, ya que es beneficioso que la cinta tenga baja fricción con la plataforma. Para que cuando el usuario la pisa, no actúe como un freno excesivamente potente que requiera más energía de la que el motor es capaz de convertir de forma segura.

Para finalizar es importante que la cinta tenga un coeficiente de rozamiento estático suficientemente grande por la cara interna, como para que el rodillo tractor pueda transmitir toda la potencia necesaria a la cinta sin que esta se deslice. La tensión de precarga aplicada en el eje paralelo a la superficie de la plataforma ayuda en este aspecto.



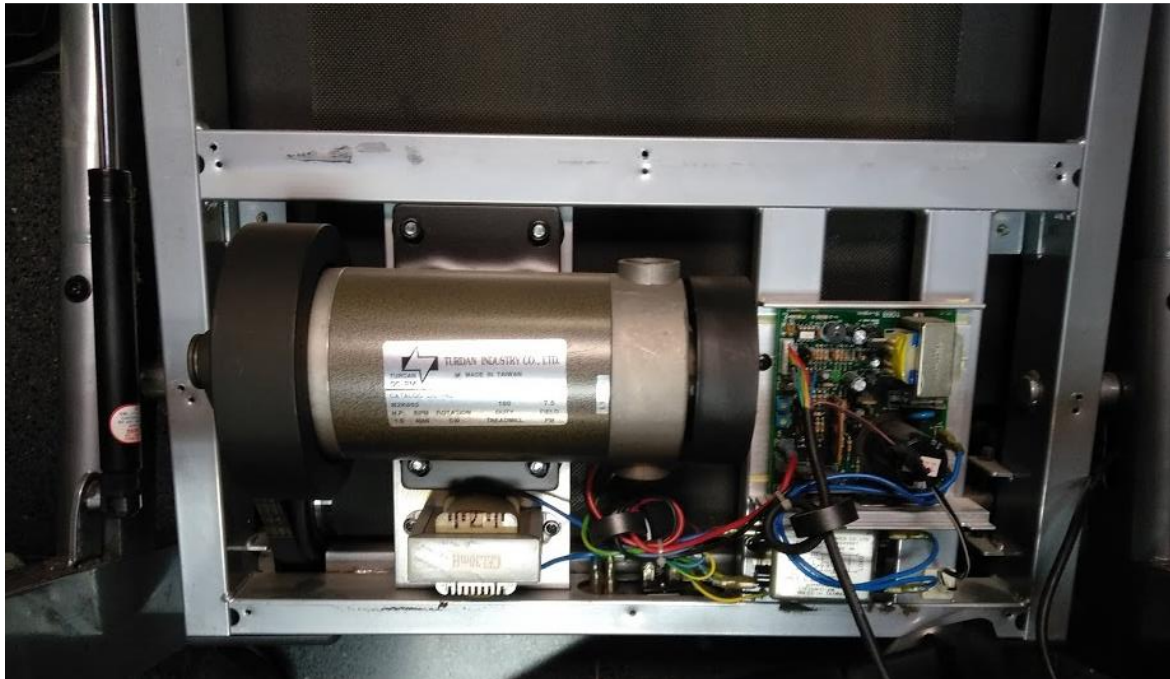
*Ilustración 44 - Cinta ergométrica en posición plegada, mostrando el muelle neumático.*

Para facilitar su transporte y almacenamiento, el dispositivo cuenta con un mecanismo de plegado. Se trata de una palanca de segundo orden asistida por un muelle neumático y un mecanismo de bloqueo automático para evitar accidentes. El muelle se sitúa entre la base fija y la plataforma móvil, reduciendo la fuerza necesaria para rotar la plataforma.

Ambos apoyos son rótulas que permiten la rotación sobre el eje perpendicular a su asiento. El mecanismo de bloqueo por otra parte consta de dos secciones cuadradas concéntricas. Una de ellas cuenta con un perímetro exterior menor que el perímetro interior de la otra, por tanto, es capaz de introducirse y deslizar por la sección cuadrada más grande.

Cuenta además con un pasador actuado por un muelle situado perpendicularmente al movimiento permitido por las varillas. La broqueta interior está ranurada de tal forma

que el muelle solo puede empujar el pasador completamente cuando la plataforma ha superado un determinado ángulo de elevación, bloqueándola en esta posición y evitando su retorno accidental y violento a la posición de ejercicio.



*Ilustración 45 - Detalle de anclaje del motor y los componentes eléctricos y electrónicos.*

El chasis sirve además como bancada para los componentes rotacionales tales como el motor, transmisión y rodillos que soportan y actúan la cinta. El motor en sí mismo está unido al chasis mediante una pletina atornillada. Al igual que los dispositivos eléctricos tales como una bobina y un filtro. También el disipador de calor de una de las dos placas de circuito que encontramos en la máquina se encuentra instalado mediante tornillería roscada directamente al chasis de la máquina.

La correa que traslada la potencia recorre el eje del motor y una rueda acanalada que gira solidaria al rodillo delantero de la cinta ergométrica. La cinta recorre el rodillo delantero para a su vez hacer lo mismo con el trasero. Los rodillos están moleteados para aumentar el coeficiente de rozamiento con la cinta y en el caso del delantero transmitir satisfactoriamente la potencia del rodillo a la cinta. Cabe destacar que



mientras el rodillo delantero transmite potencia mecánica a la cinta, el trasero no, ya que es pasivo y se limita a rotar con la cinta.

Los rodillos se unen a la cinta mediante ejes que se fijan al chasis, y que van introducidos en rodamientos que les permiten girar libremente. Para el funcionamiento correcto y estable de la cinta es necesario que los ambos rodillos sean lo más paralelos posible, de lo contrario la cinta tendería a escapar por alguno de los flancos provocando averías prematuras y una mala experiencia para el usuario. Además, como la cinta tiene un perímetro fijo, y se fabrica con materiales que limitan su elasticidad, la separación entre los ejes de rotación de ambos rodillos imponen la tensión a la banda de rodadura.

Por este motivo los rodillos cuentan con un sistema de varillas roscadas que permiten ajustar manualmente el paralelismo y la separación entre los rodillos para alcanzar el paralelismo necesario y la tensión en la banda requerida para un funcionamiento correcto.



*Ilustración 46 - Detalle de la rueda acanalada que transmite la potencia al rodillo, el mecanismo de varillas roscadas y en la parte superior se puede ver el sensor de frecuencia angular.*

Los flancos de la cinta, más sensibles a la abrasión y que implican varios tipos de riesgos mecánicos como atrapamiento, están cubiertos en toda su extensión expuesta por embellecedores y otros elementos dispuestos para tal fin.

La cinta ergométrica cuenta además con un panel de control e información dispuesto en una barra que se extiende desde los asideros y que queda justo en frente del usuario mientras este realiza la actividad deportiva. Permite seleccionar parámetros como la velocidad de rodaje de la cinta deseado y el tiempo de ejercicio entre otros. También permite visualizar, mediante sendos displays LCD de 7 segmentos monocromos diversos parámetros como la velocidad real de rotación, la distancia recorrida y el tiempo transcurrido desde el inicio del ejercicio.



*Ilustración 47 - Panel de control e información de la cinta ergométrica.*

Para la medición de la distancia recorrida, velocidad y tiempo transcurrido se ha dispuesto un sensor del que hablaremos a continuación en más detalle. Otros datos son calculados a partir de datos que introduce el usuario, y la información recogida por el sensor.

### 3.1.3.2. Apartado electrónico

En el apartado electrónico el dispositivo cuenta con dos placas electrónicas conectadas entre ellas y dos sensores, de bioimpedancia y de frecuencia angular. La placa situada en el compartimento inferior (placa principal), junto al motor, contiene las diferentes fuentes de alimentación que adecúan las diferentes tensiones requeridas por los distintos componentes a partir de la red. También contiene la mayoría de la lógica de señal del sistema, así como el controlador del motor con el interruptor estático que permite regular su velocidad de giro.

La placa auxiliar contiene los displays y la electrónica digital asociada a ellos. Tiene un nivel de integración menor y utiliza PCB de una sola cara con componentes *Trough hole* en lugar de SMD. Por lo tanto, es más barata de producir e impacta menos sobre el precio final del producto.

El sensor de bio impedancia y el de velocidad angular proveen información adicional que completa la experiencia de usuario del sistema. Ambas son soluciones económicamente viables y eficaces, con reducido o nulo mantenimiento.

Todos los sistemas se interconectan mediante un cable plano terminado en diferentes conectores, entre ellos un JST de 7 contactos que comunica la placa principal situada en el compartimento del motor, con el panel de mando e información que está montado en la parte superior de la barandilla.

También hay dos líneas que llevan la señal del sensor de frecuencia angular, situado en la rueda mayor de la transmisión, directamente hasta el display. Donde su señal es utilizada para actualizar los diferentes displays que le corresponden. También hay comunicación entre el display y el sensor de bioimpedancia, ambos en la barandilla.

### 3.1.3.2.1. Placa principal

La placa principal contiene la toma de potencia de la red, situada a la izquierda en la imagen, así como también están presentes las tomas de potencia hacia el motor a la derecha. En el apartado de conectores existe uno adicional cuya función es el intercambio de información con la placa auxiliar, así como proveer alimentación regulada para dicha placa. Es también el puerto por el que recibe las órdenes emitidas por el panel de botones para incrementar o disminuir la velocidad de rotación del propulsor.



*Ilustración 48 - Detalle de la placa electrónica principal.*

La placa dispone de algunas medidas de seguridad tales como un fusible que impide que circulen excesos de corriente por la placa, en caso de cortocircuito, por ejemplo. También está presente un varistor que limita la cantidad de tensión que puede acceder al resto del circuito.

La placa tiene tres fuentes de alimentación AC/DC, cada una con una tensión y potencia distinta. En primer lugar, hay dos pequeñas fuentes formadas por el conjunto de transformador, rectificador, filtro y regulador de tensión. En este caso ambas están limitadas en corriente por el elemento regulador, capaz de tolerar corrientes de 1 A. Dicho elemento es el regulador de tensión positiva 78XX.

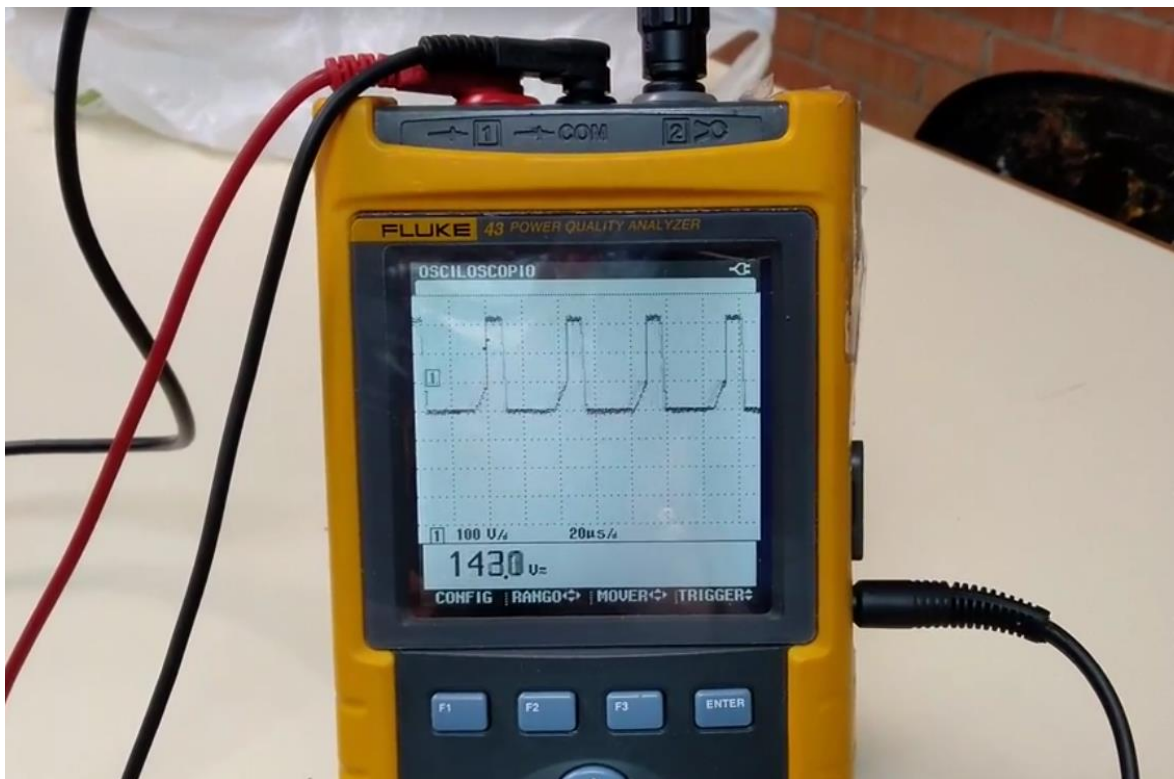
Las dos últimas cifras indican la tensión que suministra el regulador, en un caso es un 7805 por lo tanto suministra 5V. El otro da una tensión de 15V. La tercera de las fuentes, que incluye el gran condensador de filtro que se aprecia en la imagen (Elemento circular con la pegatina inscrita con "220 V"), es la fuente que convierte la tensión alterna de la red en un valor continuo que puede utilizar el motor.

En este caso como no se desea reducir el voltaje no es necesario utilizar un transformador. Si que existe un elemento rectificador, que está formado por un puente de 4 diodos y tras este el condensador de mayor capacidad capaz de hacer un filtrado de más potencia.

Esta tensión que se obtiene aún no se envía al motor, ya que de hacerlo así la velocidad de giro sería constante y la máquina solo permitiría la marcha a un régimen, lo que iría en grave detrimento de la funcionalidad. Perjudicando la utilidad del sistema como equipamiento deportivo.

En su lugar esta tensión se hace pasar por un interruptor estático dimensionado adecuadamente para la potencia que va a manejar. Y mediante un transistor de potencia de tipo IGBT se produce una señal modulada en ancho de pulso (PWM) con la que se alimentan los bornes del motor.

Variando el ciclo de trabajo de la señal se puede cambiar la velocidad de giro del motor, aunque a diferencia de un control por variación de la tensión, tenemos par máximo en todo el rango de frecuencias de trabajo. Lo que es beneficioso para el caso de uso como máquina de cinesioterapia de la marcha a bajas velocidades, permitiendo el avance satisfactorio de la banda a bajas velocidades incluso con una persona. Aunque trae consecuencias térmicas negativas como se comenta más adelante.

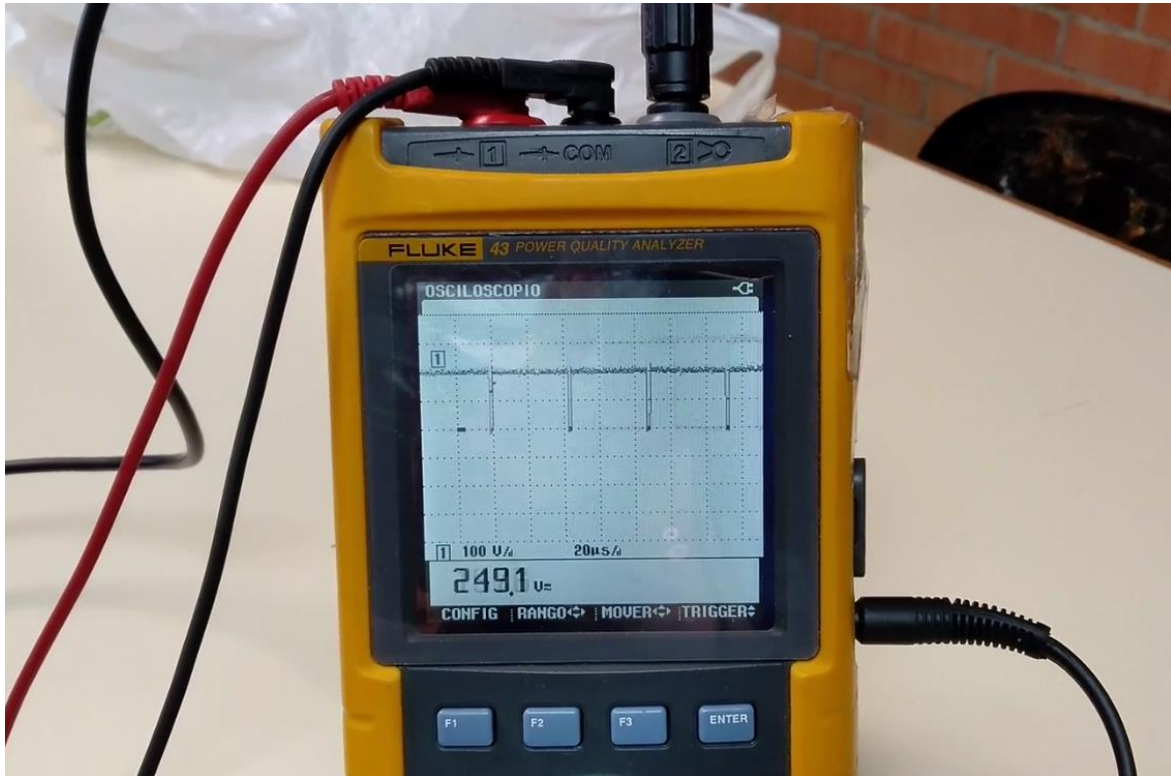


*Ilustración 49 - Modulación PWM durante el arranque del motor medido en sus bornes, se observa un efecto inductivo propio del bobinado al principio de los pulsos.*

Dicha modulación es necesario generarla mediante un circuito de señal, ya que el interruptor estático está diseñado para obedecer a uno de sus terminales llamado puerta (*Gate* en inglés). Además, al tratarse de un transistor de potencia es normal que esta puerta no sea lo suficientemente sensible para ser ordenada directamente desde un circuito de señal.

De hecho, La puerta del transistor más grande, es actuada por un transistor más pequeño que en este caso si que es capaz de ser actuado por el circuito de señal. De la generación de la señal se encarga la electrónica de señal que se encuentra en la placa,

así como el componente HIC (Circuito Integrado Híbrido por sus siglas en inglés). Sus funciones son generar una señal con los parámetros correctos de forma segura para el usuario, con funciones como aceleraciones angulares suaves y detección de sobrecarga entre otros.



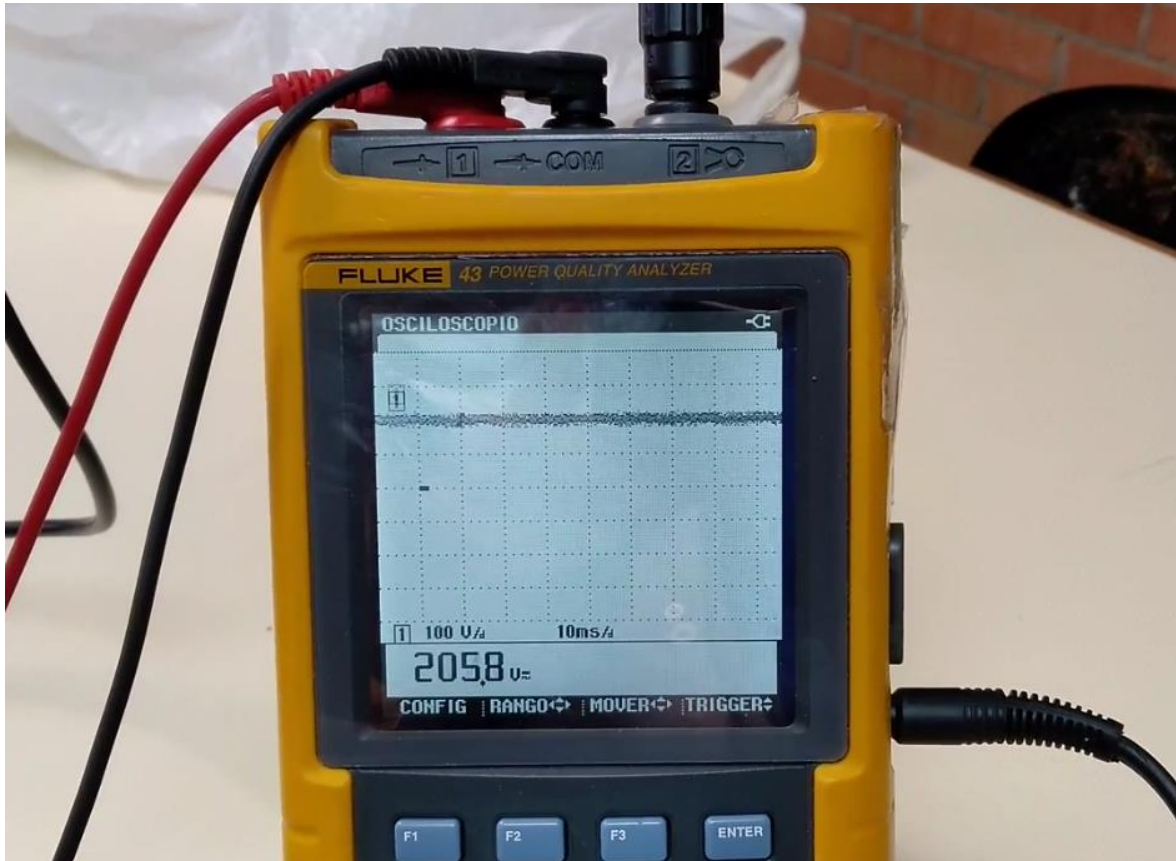
*Ilustración 50 - Cuando se alcanza el régimen estacionario a máxima velocidad el ciclo de trabajo es casi del 100% y la tensión de funcionamiento es aprox. la de pico de la red (en vacío).*

Incluye avisador acústico para notificar de las acciones al usuario por esta vía. La parte de mayor potencia y la parte de señal se encuentran aisladas entre sí por diversas técnicas e.g. el uso de masas diferentes (aisladas por inducción magnética) y el uso de dispositivos fotónicos como optoacopladores y opto transistores.

También se han colocado un par de potenciómetros para ajustar los parámetros de la señal que ataca al interruptor estático y que controla el motor. Cabe destacar que el control de velocidad es en lazo abierto lo que simplifica el circuito y aumenta su fiabilidad. La regulación sirve para compensar desviaciones estacionarias. Si que se miden los parámetros de tensión y corriente de la señal que envía al motor.



También se ha provisto de una pareja de diodos de potencia en paralelo que a su vez están en serie con el motor para que recirculen la energía almacenada en el bobinado del motor por este mismo evitando dañar los componentes y verter dicha energía no controlada en la red.



*Ilustración 51 - Cuando desaparece la señal de potencia de los bornes del motor, en sus bornes aparece una señal continua que desciende lentamente a medida que el motor pierde momento angular y la energía almacenada en el bobinado del motor.*

### 3.1.3.2.2. Placa auxiliar

Esta placa se sitúa tras el panel de mando e información de la cinta ergométrica. Se encarga de interactuar con el usuario mientras realiza la actividad física. Provee la información necesaria para que se puedan seguir programas de ejercicio cuya intensidad y duración se ha estimado oportuna. También provee la capacidad de alterar, mediante una serie de botones, los parámetros del ejercicio.

Tanto los mostrados en los displays como, de especial relevancia, la capacidad de alterar la intensidad del ejercicio, y así también iniciarlo o detenerlo cuando se requiera. Para llevar a cabo dicho control, la placa auxiliar se comunica con la principal mediante un conector JST que recorre el interior de una de las barras de soporte de la barandilla hasta el compartimento del motor situado bajo la plataforma, en el frontal de la máquina.



*Ilustración 52 - Vista posterior de la PCB auxiliar que interactúa con el usuario.*

La comunicación entre ambas placas es sencilla, se trata de un *passthrough* en el que se transmiten niveles lógicos mediante cambios en la tensión respecto a una masa

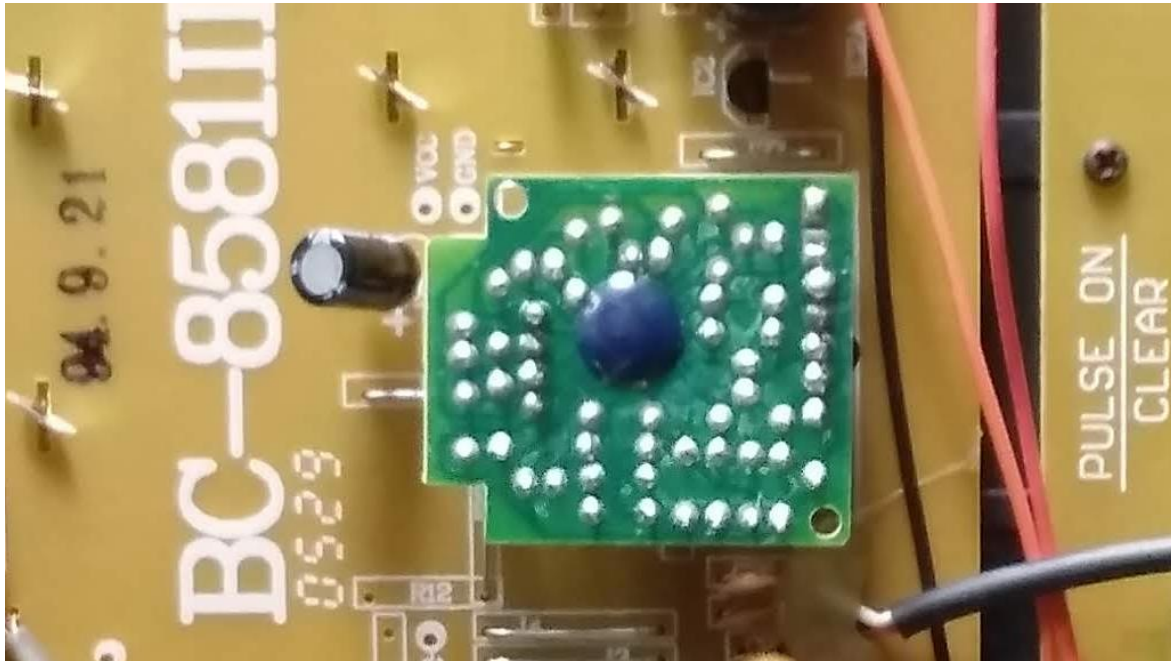
común de referencia. Por lo tanto, la pulsación de un botón se trata a través de unos pequeños circuitos lógicos y en caso de que sea una combinación válida de pulsaciones se establece momentáneamente un nivel de tensión que le indica a la placa principal que debería hacer.

En esta placa también se encuentra el sistema de paro de emergencia. Es un dispositivo con una pequeña pinza unida a una cuerda que se sujeta en la ropa del deportista. En caso de que el deportista sufra un accidente o sea incapaz de seguir el ritmo impuesto por la máquina, se alejará del panel arrastrando consigo el sistema de paro de emergencia.

Este, al activarse, desarma la propulsión provocando que la banda de rodadura baje su velocidad hasta que finalmente se detiene. Además, impide que se pueda rearmar el dispositivo e iniciar el movimiento de nuevo hasta que se reestablece el paro de emergencia a su condición de fuera de peligro.

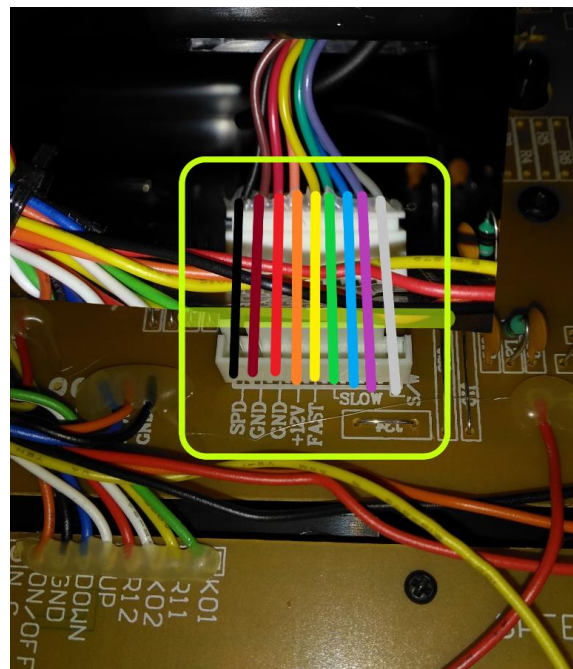
Esta señal es enviada por una línea dedicada exclusivamente al paro de emergencia. Además, la señal de normalidad es un nivel de tensión, por lo tanto, si se avería el cable y el sistema no es capaz de conocer el estado del paro de emergencia, no permitirá la activación del circuito de potencia.

La técnica de construcción es de menor integración que en el caso de la placa principal, los componentes de montaje superficial son escasos y la mayor parte de la superficie de las tarjetas es de una cara con montaje *through hole*. Destaca el uso de un circuito integrado específico para la aplicación (ASIC p.s.s. en inglés) encapsulado en epoxi, que complica el diseño, aunque no lo encarece indebidamente.



*Ilustración 53 - Detalle del ASIC encapsulado en epoxi de la placa auxiliar.*

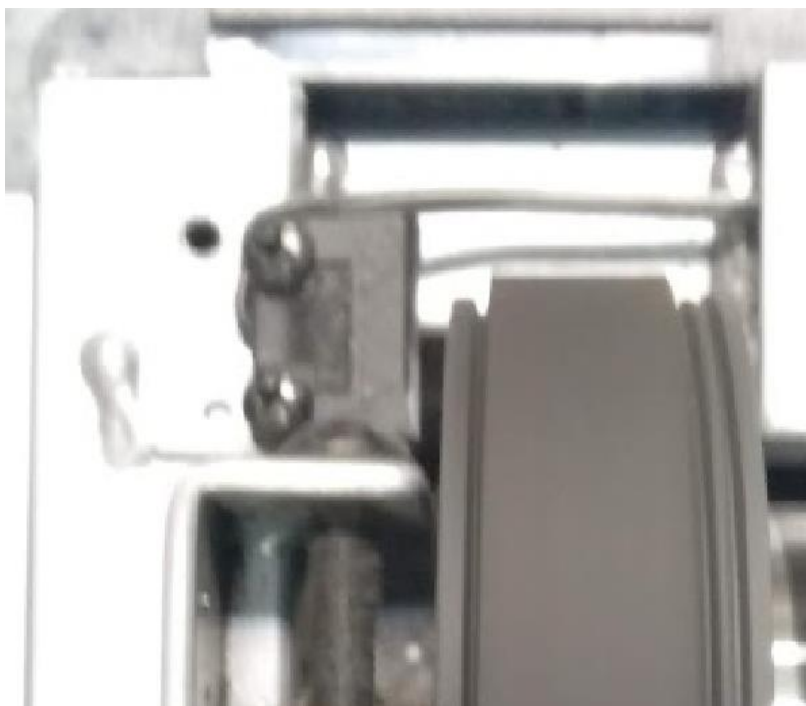
En general todos los sistemas de este apartado destacan por su sencillez y elevado estado de madurez, lo que impacta positivamente en el conjunto; reduciendo su coste y aumentando la fiabilidad. Cualidades necesarias para su viabilidad como producto comercial producido en masa.



*Ilustración 54 - Detalle de la comunicación entre ambas placas.*

### 3.1.3.2.3. Sensor de frecuencia angular

Ya hemos establecido que el control del motor es en lazo abierto, mediante un procedimiento que se detallará más adelante. Sin embargo, para mostrar información en los displays es necesario obtener información del funcionamiento de la cinta ergométrica.



*Ilustración 55 - Detalle del punto de montaje del sensor de frecuencia angular en la rueda mayor de la transmisión de la cinta ergométrica.*

Concretamente un dato muy útil es la frecuencia angular del rodillo, ya que mediante técnicas de odometría y con algunos datos geométricos conocidos, es posible calcular datos tan interesantes como la velocidad a la que se avanza, la distancia recorrida o cuanto tiempo se ha estado realizando el ejercicio.

En el siguiente ejemplo sencillo podemos relacionar la frecuencia angular con la velocidad de avance. Primero calculamos la distancia recorrida:

En primer lugar, necesitamos conocer el radio del rodillo, y a partir de él calculamos el perímetro de este mediante la siguiente expresión:

$$L = 2 \cdot \pi \cdot \frac{R}{1000}$$

En la que introduciremos el radio en milímetros y nos devolverá su perímetro en metros. Este es a su vez la distancia lineal que avanza la cinta en cada revolución del rodillo.

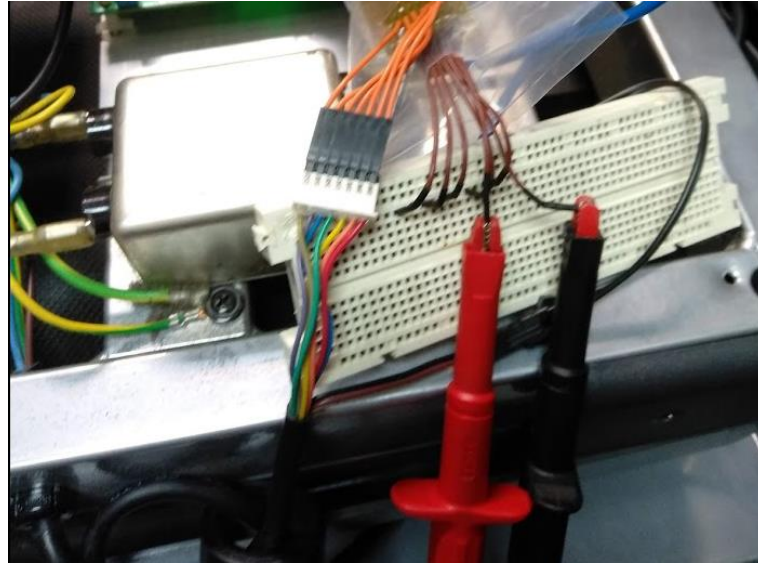
El sensor no está claramente identificado, ya que es posible que se trate de un componente genérico. Al no estar disponible documentación de calidad, para conocer la implementación concreta del sensor, se caracteriza la señal que produce en régimen permanente. Se mide en sus bornes mientras el aparato está funcionando.

Esta tarea entraña la dificultad añadida de que la cinta ergométrica en cuestión tiene una avería. Por lo tanto, hay separar los datos reales de los errores no sistemáticos producidos por la avería.

Se obtiene un régimen permanente en la que corresponde a una velocidad arbitraria de rotación del motor y se procede a realizar la medida.

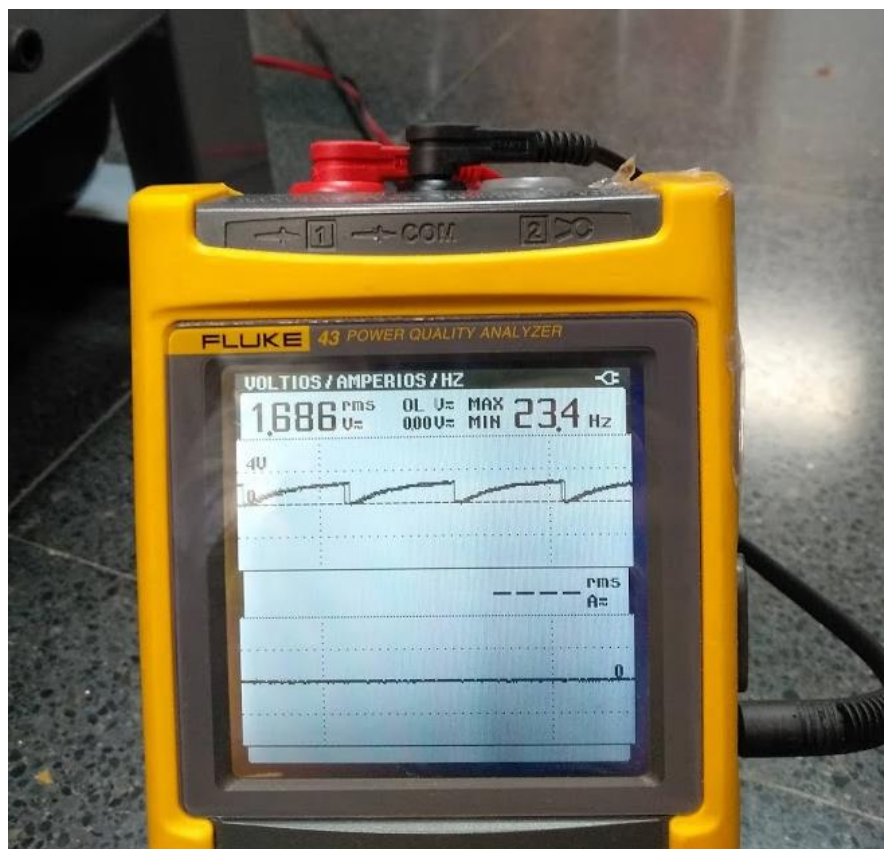
Debido a que esta medida no está prevista por el fabricante es necesario fabricar un dispositivo que permita acceder a los contactos de los conectores de forma segura sin interrumpir el funcionamiento de la máquina.

Para ello se llega al diseño de un puente sobre una PCB de prototipos en el que se incluyen conectores Berg que unen los contactos como el diseño original, aunque se añaden conectores adicionales en cada una de las líneas para la toma de las medidas.



*Ilustración 56 - Puente realizado para hacer medidas seguras y no invasivas.*

Además, para realizar las medidas se utiliza un osciloscopio asilado, cuya impedancia en los terminales de medida es muy alta. Lo que permite que la medida no afecte al funcionamiento de la cinta ergométrica.



*Ilustración 57 - Señal que genera el sensor de frecuencia angular.*

Se observa un flanco de bajada claramente cada vez que el rodillo completa una revolución, por lo tanto, podemos detectar dichos flancos de bajada y contarlos.

Ahora conocer la distancia recorrida es trivial, y basta con multiplicar el número de veces que la señal cruza un umbral determinado y multiplicarlos por el perímetro de la sección del rodillo, e.g.

Para un diámetro de rodillo de 50 mm y  $n = 100$  revoluciones:

$$L = 2 \cdot \pi \cdot \frac{50 \text{ (mm)}}{1000} = \frac{2 \cdot \pi}{20} \text{ (m)}$$

Multiplicamos ahora por el número de revoluciones:

$$D = L \cdot n = \frac{2 \cdot \pi}{20} \text{ (m)} \cdot 100 = 10\pi \text{ (m)}$$

Tanto el contador como los operadores para aritmética básica se pueden implementar en circuitos combinacionales en silicio lo que permite una latencia muy baja para completar dichas operaciones. Se utilizan números naturales para ejemplificar el cálculo y facilitar su comprensión, aunque en la realidad se trabaja con valores del conjunto de números reales, expresados con decimales, estos se tratarán preferiblemente en coma fija para obtener buenas prestaciones de velocidad.

Ahora midiendo el tiempo que el rodillo tarda en completar todas las revoluciones tenemos información suficiente para calcular la velocidad de la banda de rodadura. La velocidad relaciona el espacio y el tiempo según la siguiente expresión:

$$V = \frac{D}{t_D}$$

Asumiendo que la cinta recorre la distancia  $D$  calculada anteriormente en un tiempo  $t_D$  de 10 segundos:

$$V = \frac{D}{t_D} = \frac{10\pi \text{ (m)}}{10 \text{ (S)}} = \pi \text{ (m} \cdot \text{S}^{-1}\text{)}$$

Conocemos la velocidad de avance de la cinta que es igual en módulo a la velocidad del deportista, pero en sentido contrario.

Cabe destacar que podemos iniciar y parar el cronómetro justo en los puntos en los que contamos la cantidad de revoluciones acumuladas, debido a la naturaleza de la



realización de la medida. Por lo que la bondad de la estimación dependerá de la precisión en las tolerancias de fabricación del rodillo, que se ajusten al valor teórico. En la capacidad de nuestro detector de contar todas las revoluciones y finalmente en la precisión del reloj para medir el tiempo transcurrido.

Para la aplicación que nos ocupa la precisión es la necesaria para que la medida de velocidad sea suficientemente buena. Permite seguir protocolos de ejercicio de forma adecuada.



*Ilustración 58 - Displays mostrando información sobre la velocidad, tiempo transcurrido y una estimación de las calorías consumidas por el usuario*

### *3.1.4. Implementación*

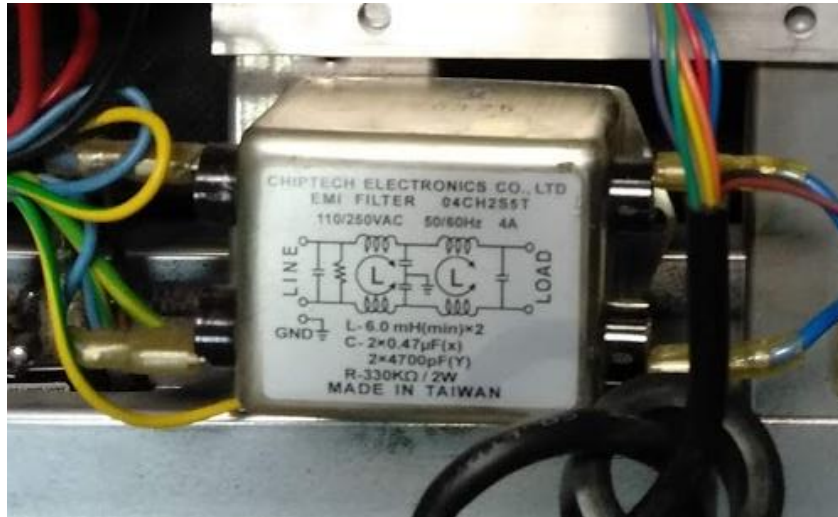
En la fase de implementación vamos a aislar la causa de la avería. A partir de la investigación realizada tanto del análisis de requisitos y especificaciones, como del análisis funcional y el de arquitectura del sistema conocemos cuales son los parámetros de funcionamiento adecuados y el comportamiento que debe presentar el sistema y sus componentes más relevantes.

Para observar las causas del deterioro es necesario comprobar con detenimiento si el funcionamiento de los diferentes elementos que componen la arquitectura del sistema es el esperado. En caso contrario, si las anomalías son la causa principal, o en su defecto se trata de consecuencias producidas por la causa raíz.

Para ello se procede a la inspección detallada del sistema tomando las observaciones y medidas necesarias para dar con la causa del problema:

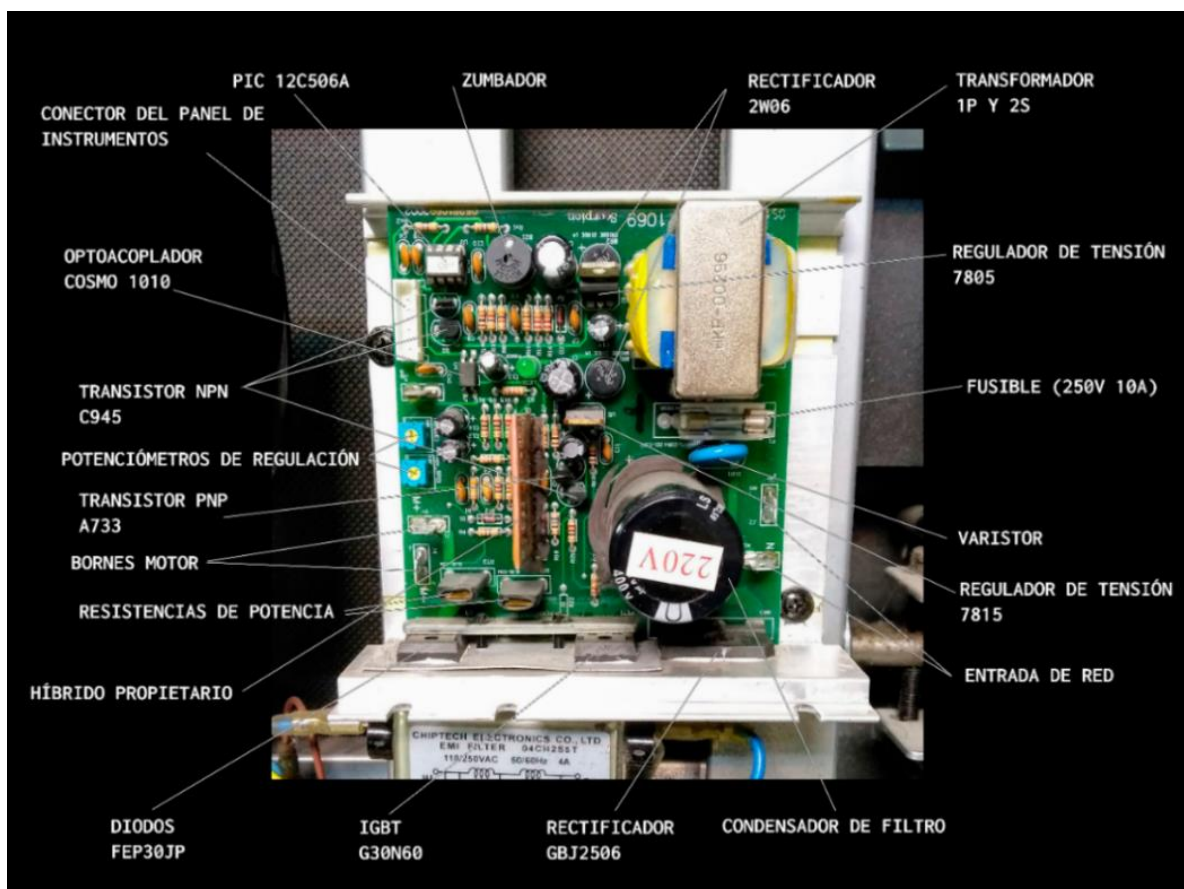
En primer lugar, se destapa la parte de potencia, oculta por un armazón de inyección de plástico. Este se sujeta por ocho tornillos de cabeza alomada con arandela y punta broca de cincado Negro (Norma 16B-91) auto taladrantes. Se encuentran Situados junto a la entrada de energía eléctrica de la red. En la parte frontal de la cinta, bajo el panel de mandos.

En esta zona de la cinta ergométrica hay un interruptor, una gran bobina de 30 mili Henrios y un filtro de emisiones electromagnéticas (EMI). Este último tiene tanto bobinas como condensadores y algunos elementos resistivos. En su etiqueta pueden verse sus disposiciones, así como los valores nominales de los componentes.



*Ilustración 59 - Filtro de emisiones electromagnéticas con su etiqueta correspondiente en la que hay un diagrama de la disposición de sus componentes.*

A continuación, llegamos a la placa que incluye tanto el módulo de alimentación, como el módulo de potencia, así como el módulo de control. Es posible que también se incluya el módulo de protección en esta placa.



*Ilustración 60 - Componentes más relevantes señalados sobre la placa principal.*

Como es posible que la causa generadora de la avería se encuentre en la placa principal, se haría posteriormente un análisis más detallado de esta. Siempre y cuando no sea hallada antes en otros componentes. Cuyo estudio es más rápido y sencillo. Por eso se continúan analizando los otros componentes.

Esta máquina no incluye módulo de elevación automático, aunque se puede variar la pendiente de forma manual y ajustar en diferentes posiciones mediante un mecanismo en la parte posterior.

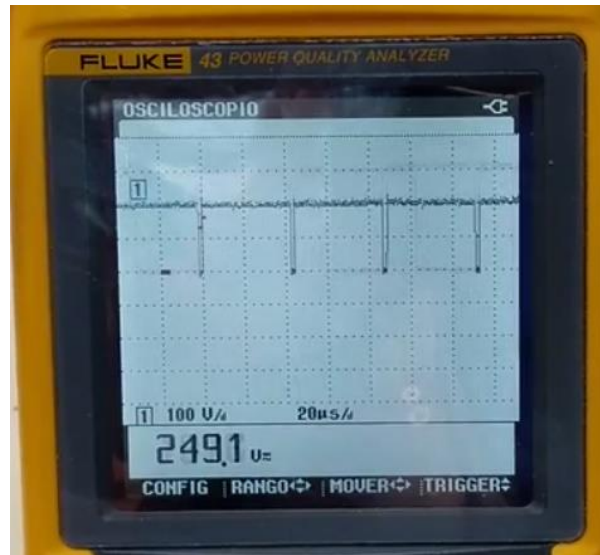


*Ilustración 61 - Etiqueta de servicio del motor eléctrico de corriente continua de imanes permanentes (PMDCM por sus siglas en inglés) que propulsa la banda de rodadura.*

En la etiqueta del motor de la máquina se establece que la potencia nominal del motor es de 1.5 caballos de fuerza (HP – medida anglosajona de potencia) que equivalen a 1.1186 kW en el sistema internacional de unidades. Además, está etiquetado para una velocidad angular de 4000 rpm. Su rotación es en sentido horario, esto se debe al ángulo de ataque de las palas del ventilador que está acoplado al eje del motor, y que lo refrigera.

Está clasificado para su uso a una tensión de 180 V con una corriente máxima de 7.5 A. Lo que permite calcular en una potencia interna total máxima de 1.35 kW. De la etiqueta también se extrae el fabricante y tipo de motor, en este caso se trata de un motor de corriente continua de imanes permanentes. Que aparentemente está diseñado específicamente para la tarea de motor de cinta de fitness.

Medimos con un osciloscopio aislado portátil (Fluke 4X) y comprobamos aparecen una serie de ondas en los bornes del motor. En régimen estacionario la tensión es de unos 250V y se aprecian los ciclos de conmutación PWM.



*Ilustración 62 - Tensión en bornes del motor en régimen estacionario.*

El comportamiento de la corriente es el esperado ya que hay un flujo de corriente continua hacia el motor. También aparecen componentes frecuenciales derivados de la red y la conmutación, tanto del interruptor estático como de las propias escobillas del motor.

Aunque el motor es el síntoma más evidente de la avería no es necesariamente la causa de esta. Por ello es necesario descartar cualquier posible anomalía en el motor.

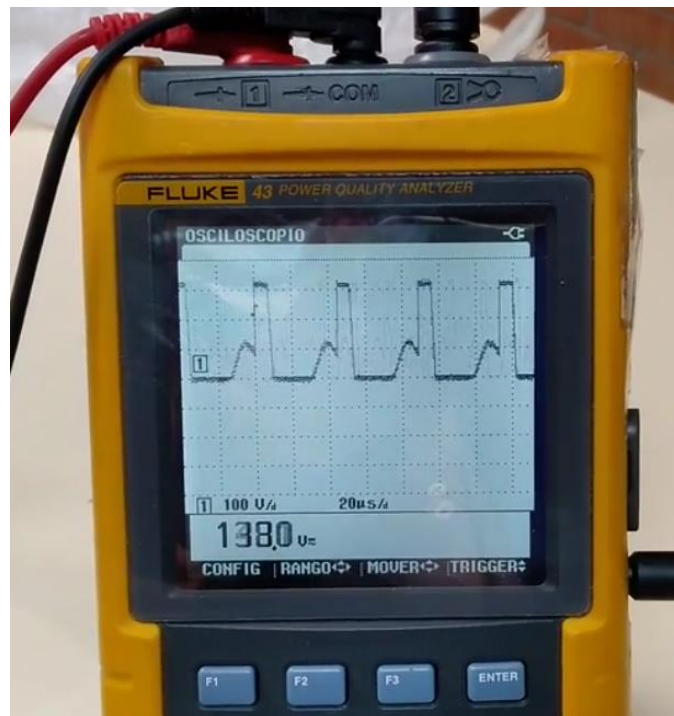


*Ilustración 63 - corriente que atraviesa el bobinado del motor, en vacío.*

Se modifican los lazos de regulación, identificados como velocidad máxima y par, incluidos en la placa. Ahora la máquina entra en un estado en el que funciona a máxima velocidad y para de forma cíclica.

Como el tiempo de parada es bastante elevado, debido al volante de inercia acoplado al eje del motor; también debido al diseño electrónico de potencia, que mediante un diodo volante recircula la energía del motor por su bobinado, provocando una parada lenta. el resultado es que cambia de régimen constantemente. Alcanza una velocidad, hipotéticamente la máxima de la máquina, y tras un breve instante comienza a desacelerar de nuevo. Antes de que se pare por completo, el ciclo vuelve a comenzar indefinidamente.

Este régimen permite observar lo que parece un control por PWM que funciona a unos 50 kHz es decir el periodo es de unos 2 microsegundos. Además, en la onda (que debería ser cuadrada) se aprecia una distorsión que sería provocada por el mecanismo de parada lenta con el diodo volante. Aparece en forma de oscilación sinusoidal anterior al pulso premeditado del elemento de potencia.



*Ilustración 64 - onda que se observa en el régimen transitorio cuando la cinta está acelerando.*

En este punto aún no se puede descartar un fallo en los elementos de potencia, especialmente el interruptor estático, aunque parecería que son capaces de cambiar su señal de salida, por lo tanto, podrían estar intactos. Lo que supondría un cambio de paradigma en este apartado del estudio. Ya que esta era la presunta causa de la avería.

Esto es porque cuando una máquina eléctrica libera potencia de forma descontrolada lo habitual es que el dispositivo semiconductor que controla la rama de potencia en cuestión se haya roto, en este caso volviéndose conductor permanentemente.

Esto se debe a que además el dispositivo que interrumpe la potencia sufre especialmente en casos en que circule tensión o corrientes excesivas, siendo este último caso el más agresivo para los componentes. Pueden recalentarse superando el parámetro de temperatura máxima en la unión (*Maximum Junction temperatura rating*) indicado por el fabricante en la hoja de datos técnicos del componente (150 °C para el IGBT G30N60) y perdiendo sus propiedades semiconductoras.

A continuación, podemos buscar otras causas de avería, empezando por el motor. Comprobamos la impedancia de la bobina y la longitud y buen estado general de las escobillas. Ambas se encuentran en orden de funcionamiento y sus no son anómalas.



*Ilustración 65 - Estado de las escobillas del motor de imanes permanentes que accionan la cinta ergométrica. Se utiliza una moneda como referencia de tamaño.*

Las escobillas están dentro de su longitud de servicio y también se aprecia un estado adecuado de las delgas de contacto del motor. Otras posibles causas son, una resistencia mecánica no uniforme en algún punto del tren móvil, así como un fallo de la regulación que provenga de la electrónica.

También es necesario descartar una avería del motor. Las causas mecánicas se pueden descartar accionando manualmente el recorrido de la máquina, y apreciando de manera particular si existen puntos que ofrezcan mayor resistencia mecánica que otros.

Los orígenes electrónicos se analizan mediante el uso de un osciloscopio aislado, en el que se observa la onda que controla el motor. Para detectar averías en el motor se podría ensayar el mismo tanto a rotor bloqueado como en cortocircuito. Ensayos en los que se apreciarían irregularidades en las curvas de par y posición angular, así como otras degradaciones de sus características respecto a las que indica la documentación técnica del fabricante.

Sin embargo, como es capaz de alcanzar un régimen permanente, el motor se desvanece como posible causante de la avería. Y lo más razonable es continuar estudiando el comportamiento pormenorizado de otros componentes.

A continuación, mediante observación directa se aprende que el panel de mandos, a pesar del estado en el que se encuentran los pulsadores, podría ser operativo. Esto es porque responde con señales acústicas a las pulsaciones, aunque no se aprecie cambio alguno en la velocidad de avance del actuador. Dichas señales acústicas, en ocasiones son rápidas y repetitivas, lo que indicaría que las pulsaciones se están registrando de manera incorrecta.

Por otra parte, al desconectar el sensor de velocidad la única diferencia apreciable es que se deja de mostrar la velocidad de avance de la cinta en el display, no hay cambios en la regulación del actuador. Lo que indica que dicha regulación es de lazo abierto; opuesta a la regulación en lazo cerrado en la que la entrada del sistema está realimentada por la salida. Y que por tanto puede responder a cambios en esta.

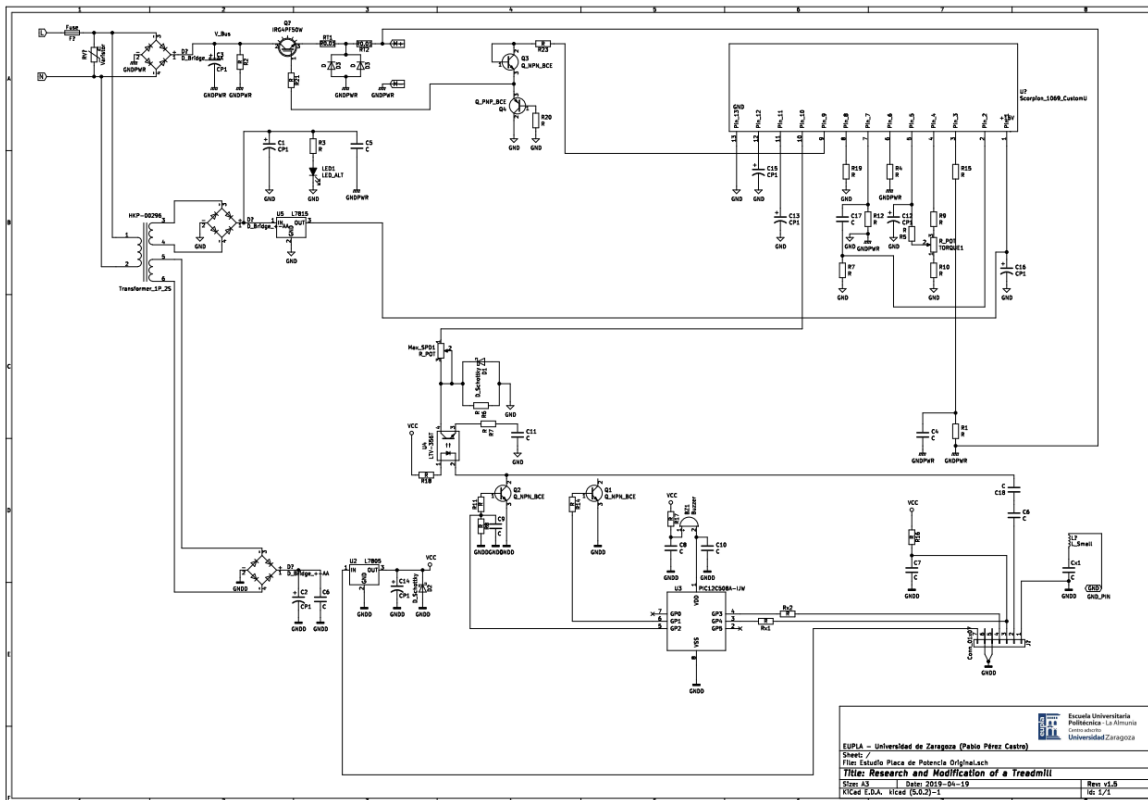


Se procede al estudio del módulo de potencia. Se identifica fabricante y modelo, con él se investiga procurando recopilar información técnica del mismo, posteriormente se procederá al análisis del circuito y sus componentes recopilando los datos y documentación técnica. Así se profundiza en el análisis del módulo, y se entiende con más amplitud su funcionamiento.

El modelo de la placa de control que incorpora el dispositivo es "*Control BC-1069 Scorpion*". La documentación técnica no está fácilmente accesible en Internet. Investigando en fórums públicos y otras fuentes no aparece información sobre la placa exacta tampoco, así que se procede al estudio pormenorizado de la placa física.

El objetivo es averiguar el papel de los componentes, así como obtener el esquema del circuito. Para ello se identificarán los componentes mediante las serigrafías de estos, mediante las pistas impresas y realizando varias horas de ingeniería inversa del circuito. Por último, se utilizarán nociones generales de etapas de potencia de otras cintas contemporáneas para conocer el objetivo de los circuitos que existen en el diseño.

Se analiza el circuito, para ello se obtiene la documentación técnica, esta vez de los componentes y se siguen las conexiones entre ellos. El resultado es un esquema eléctrico con la disposición eléctrica aproximada del originalmente diseñado.

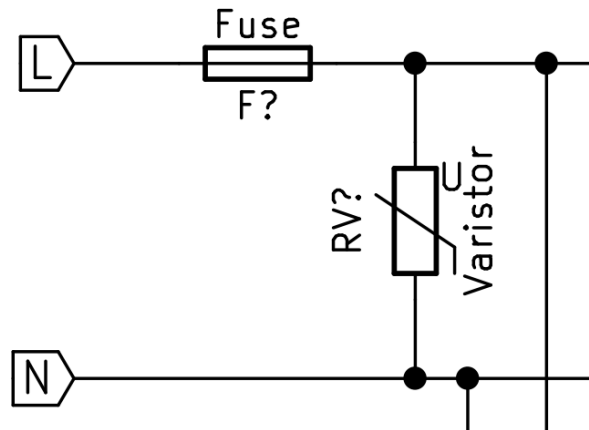


*Ilustración 66 - Vista general del esquema obtenido por ingeniería inversa de la placa principal.*

El circuito se puede dividir principalmente en tres áreas diferenciadas. La parte correspondiente a las alimentaciones, la rama de potencia y la parte de señal. Vamos a ver con más detalles las diferentes zonas.

Empezando en orden de lectura, por la parte superior izquierda del esquema encontramos la entrada de alimentación de red. Que conduce los 230 V de la red y los introduce en el circuito. Se hace distinción entre la línea y el neutro para poder referirse estas ramas. Aunque a efectos prácticos pueden conectarse a la red indistintamente.

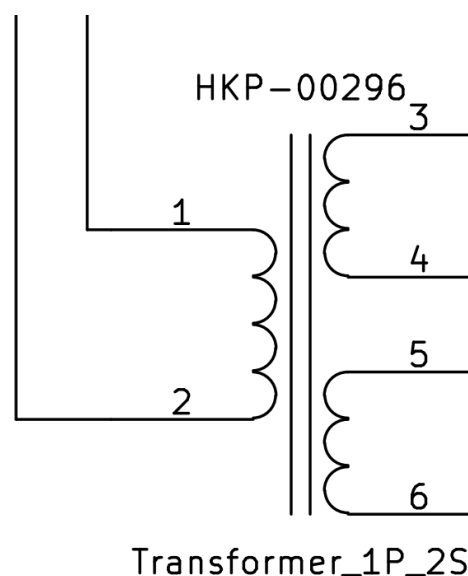
En la rama etiquetada como línea hay un fusible en serie, mientras que un varistor une las líneas y el neutro. Esto es para que en caso de exceso de tensión la corriente circule por él, en lugar de hacerlo por el circuito, donde los componentes podrían resultar dañados.



*Ilustración 67 - detalle de las protecciones eléctricas incluidas en la entrada de alimentación de la placa principal.*

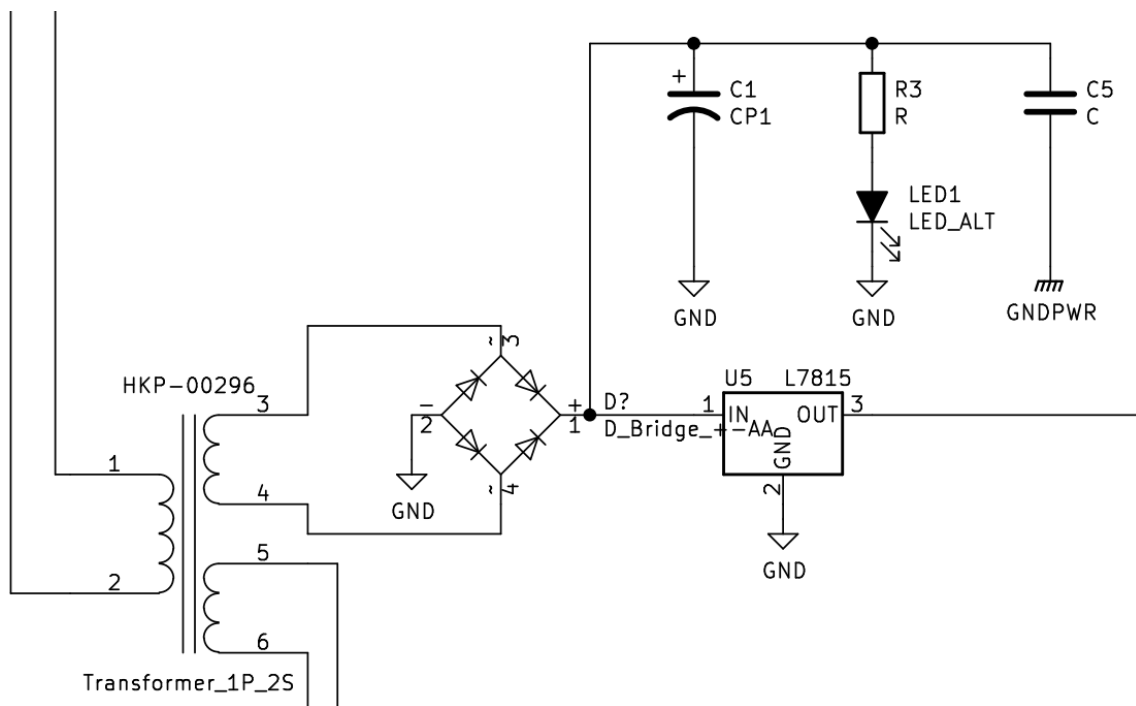
Tras el varistor aparecen una serie de conexiones que alimentan los convertidores de tensión, así como la rama de potencia. Ambos conversores requieren un cambio de tensión, a diferencia de la rama de potencia que tan solo se rectifica. Por lo que requerirían transformadores que tomen la tensión de entrada y reduzcan la amplitud de la onda de salida hasta el valor adecuado.

En lugar de poner dos transformadores para cada una de las ramas de alimentación, se ha optado por el uso de un único componente. Un transformador con un bobinado primario y dos secundarios, cada uno construido con el número de vueltas necesario para tener una tensión de salida adecuada.



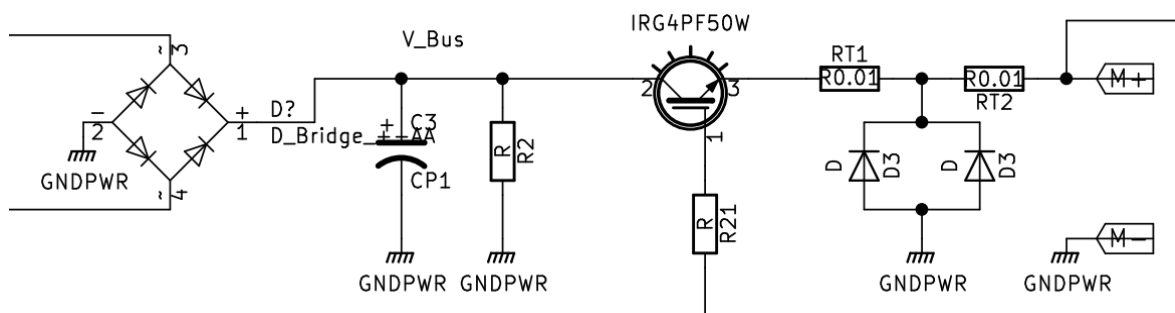
*Ilustración 68 - Transformador de un primario y dos secundarios que alimenta los rectificadores de escasa potencia.*

Ambos convertidores incluyen un puente rectificador y un regulador con sus correspondientes filtros. Para que a la salida haya una tensión continua fijada al valor adecuado. Además, en el caso de la rama de 15 V se encuentra el indicador luminoso de alimentación compuesto por un diodo led y su correspondiente resistencia limitadora. También hay una conexión capacitiva con la masa de potencia por motivos que se detallarán más adelante. Esta rama alimenta el desarrollo híbrido (HIC) de la placa.



*Ilustración 69 - Fuente de alimentación de 15 V, también indicador de alimentación.*

Por otra parte, la rama de potencia está compuesta de una etapa de rectificación de potencia. Seguidamente se dispone un gran condensador de filtro y su correspondiente resistencia de descarga para evitar que se mantenga cargado a tensiones peligrosas después de un largo tiempo de haber perdido alimentación.

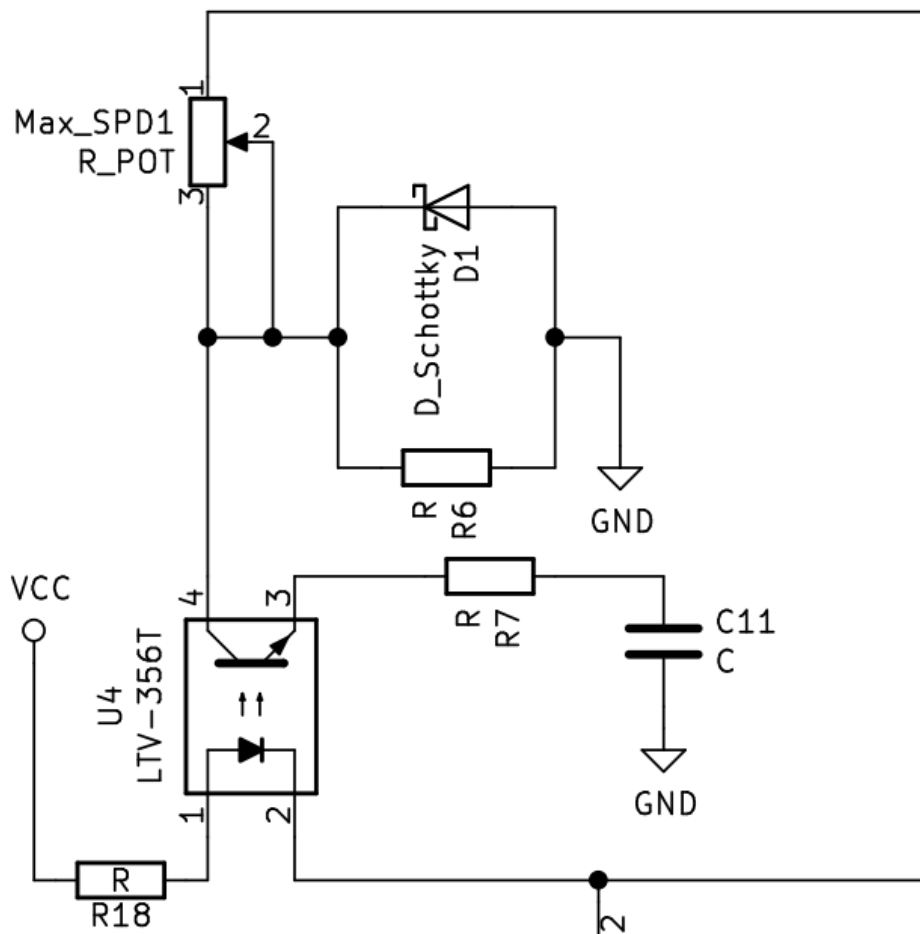


*Ilustración 70 - Convertidor AC/DC de potencia y maniobra de potencia con salida al motor.*

A continuación, se encuentra la maniobra de potencia propiamente dicha, que consiste en el interruptor estático en sí mismo. Se trata de un IGBT de potencia capaz de interrumpir el flujo de corriente al motor a frecuencias considerables. Hemos establecido anteriormente que opera a una frecuencia de 50 kHz.

Lo siguiente es una pareja de diodos de potencia que hacen la función de diodo volante del motor, recirculando la corriente que devuelve por su propio bobinado, evitando la sobrecarga del resto del circuito y otros fenómenos indeseados. Además, hay unas resistencias de potencia de baja resistividad, que permiten medir tanto la tensión como la corriente de salida mediante la pequeña caída de tensión que generan. Para finalizar desembocando en los bornes del motor.

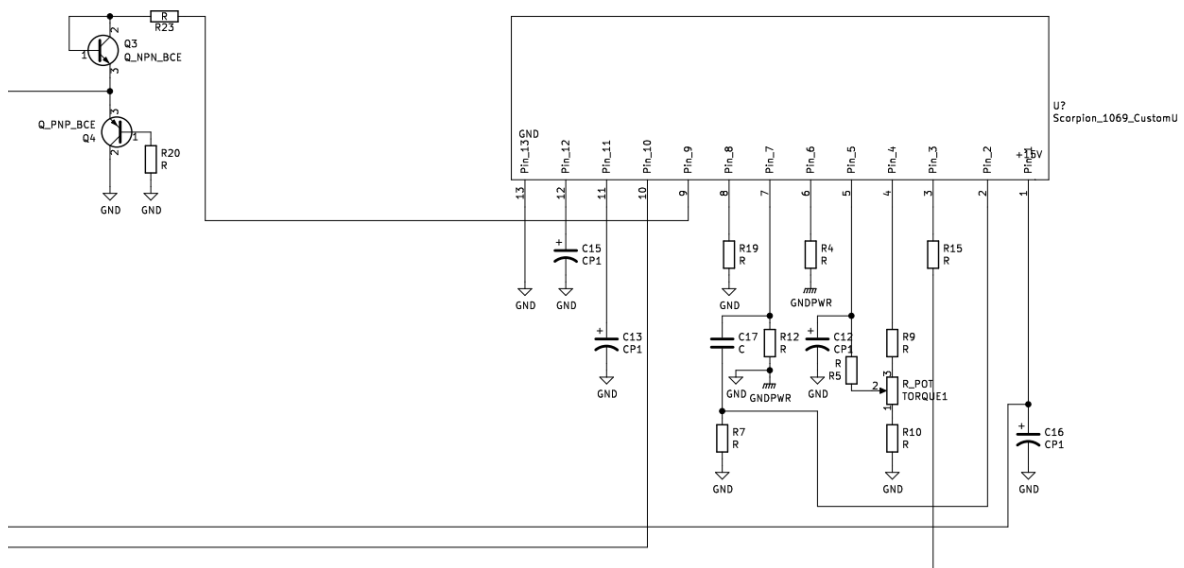
Cabe destacar que el módulo incluye dos componentes con encapsulados similares, aunque uno de los componentes es un IGBT y el otro un puente rectificador con dos diodos. También hay una ranura vacía para un segundo IGBT que no fue colocado en el origen.



*Ilustración 71 - Desacople óptico de los circuitos.*

Los circuitos se encuentran desacoplados ópticamente por medio de un dispositivo fotónico que permite el paso de las señales, pero utiliza emisores de fotones y semiconductores sensibles a estos para transmitir la información, en lugar tensiones eléctricas. De esta manera no hay conexión eléctrica entre ambos circuitos y el valor dieléctrico entre ellos hace que sean necesarios del orden de kilo voltios de tensión entre ambos circuitos antes de que se produzca una ruptura dieléctrica entre ambos.

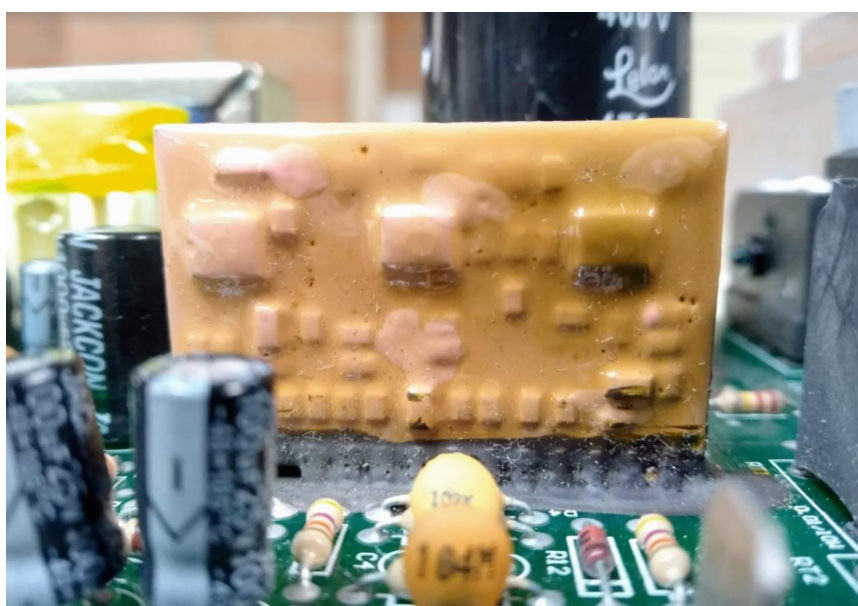
En la parte de 5 V hay un pequeño microcontrolador, junto con el zumbador y algo de electrónica analógica. Actúa de interfaz con el panel de instrumentos recibiendo las señales de este y comunicándose ópticamente con el HIC propietario del fabricante.



*Ilustración 72 - E/S del circuito híbrido HIC propietario del fabricante.*

Este componente recibe la señal del microcontrolador y produce la señal para controlar los pequeños transistores que a su vez controlan el interruptor estático de la rama de potencia. Desafortunadamente este tipo de componentes están recubiertos de resina epoxi lo que no permite su estudio pormenorizado.

Sin embargo, es posible estudiar su entrada y salida de señales, lo que lleva a la conclusión de que es el causante de la avería, ya que, aunque recibe las señales correctamente. No reciproca enviando una señal de salida correcta a los transistores.



*Ilustración 73 - Inspección visual del componente HIC.*

Además, una inspección visual revela un claro oscurecimiento en el lado derecho del componente lo que indica que ha sufrido algún tipo de recalentamiento.

Dada la información recabada, es la causa más probable del comportamiento del dispositivo. Además, desafortunadamente no es posible estudiar detalladamente esta parte propietaria del circuito, ya que está recubierto con resina epóxica. Un polímero de uso común en componentes eléctricos y electrónicos.

Esto puede resultar en el análisis de las señales de la placa auxiliar, que se encuentra en la consola, ya que a priori sería la única manera de que la máquina funcione sin dar códigos error, esta hipótesis plantea que si la máquina no da errores podría deberse a que el dispositivo que tiene que emitirlos no estaría operando correctamente. Aunque este análisis pierde relevancia dadas las condiciones expuestas anteriormente.

Por consiguiente, se solicita un sustituto de la placa de potencia, ya que se identifica el fallo electrónico en una zona de desarrollo híbrido de la placa, que se encuentra construida con componentes de montaje superficial (SMD) y además los fabricantes, en un esfuerzo por limitar la copia del diseño, han recubierto en una resina epoxi. Elevando la dificultad de estudiar el diseño hasta que resulta imposible en la práctica.

En realidad, la asociación gestiona la adquisición. Se le proveen instrucciones específicas de la referencia del diseño de placa que deben adquirir para colaborar con el proyecto. En alguna fase de este proceso ya sea en el entorno de la asociación o en el proveedor, se intercambia el diseño original por un diseño distinto.





*Ilustración 74 - Placa de sustitución, distinta a la original.*

De modo que se eleva la complejidad de la investigación, ya que utiliza técnicas y tecnologías diferentes a la placa que nos encontramos al principio en la cinta. Que permiten al diseño cumplir normativas más modernas sobre consumos en reposo, entre otras cuestiones.

Esta nueva placa es funcionalmente compatible con la original, aunque su arquitectura tiene algunas desviaciones significativas. Por lo tanto, al cumplir los requisitos y especificaciones del fabricante, así como los añadidos por normas más recientes no solo es una implementación tan buena como la original, sino que además mejora en los apartados de seguridad y consumo en reposo.

Solo queda llevar a cabo una prueba de conexión eléctrica, para comprobar que la nueva placa solventa el problema de la cinta ergométrica. Y que ahora funciona con normalidad. Como cabría esperar.

En este nuevo marco de referencia el dispositivo cambia su comportamiento. Ahora es posible regular diferentes velocidades en el tren de potencia. Sin embargo, tal

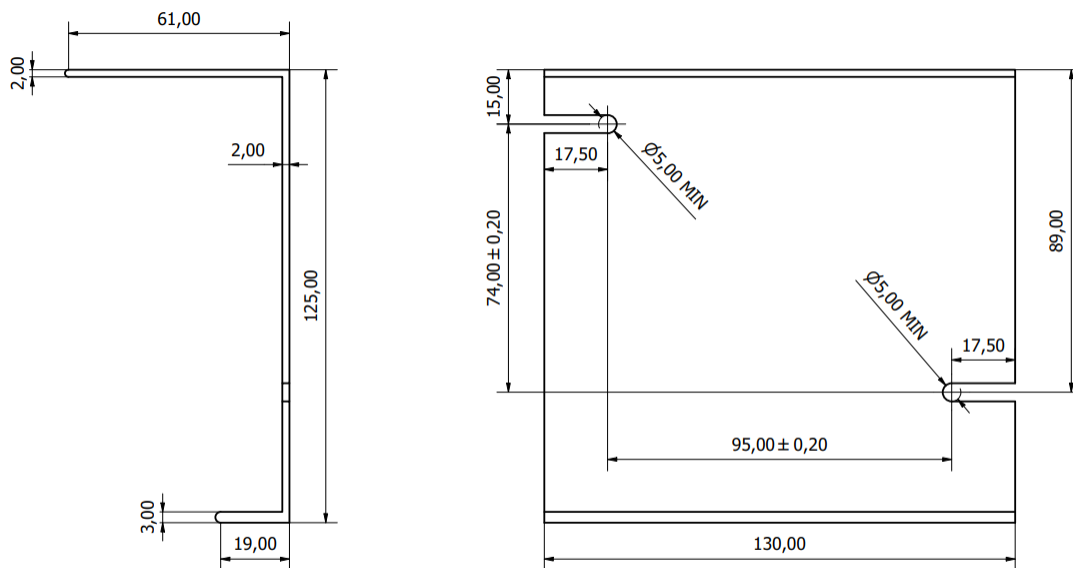
y como la ha enviado el proveedor aparecen oscilaciones repetitivas que dan lugar a un comportamiento errático en el avance de la cinta. Además, cabe destacar que este fallo se puede producir por una causa mecánica, así como eléctrica, debido a su carácter cíclico.

Dado que la nueva placa es capaz ahora de cambiar la velocidad angular del motor, pero no así de mantenerlo en régimen permanente. Lo siguiente que se puede hacer es cambiar los parámetros de regulación que vienen fijados por el fabricante por un débil sello de cola termofusible.

Tras aumentar el par máximo la cinta ergométrica alcanza el régimen permanente y vuelve a cumplir los requisitos como equipamiento deportivo, con especificaciones ligeramente mejoradas, aunque en general un poco obsoletas.

Para completar la restauración es necesario montar permanentemente la nueva placa de potencia. Lo que podría resultar una tarea trivial, a excepción de que el Cambio de modelo de la placa de potencia trae consigo también un cambio en el refrigerador de esta.

Como el anclaje de la placa al chasis no se adhiere a un estándar, los agujeros no coinciden. Por lo tanto, es necesario mecanizar unos nuevos agujeros en el refrigerador que coinciden con los puntos de amarre que incorpora la máquina. Para la fijación se utilizan los mismos tornillos alomados auto taladrantes que sujetaban la antigua placa.



*Ilustración 75 - Esquemas técnicos de las operaciones de mecanizado necesarias para que la nueva placa pueda instalarse en la cinta ergométrica.*

El proceso de mecanizado requiere de la elaboración de la documentación técnica correspondiente, en este caso un plano que incluye las cotas tanto de los orificios como de su posición y tolerancias.

Se desmonta la tarjeta electrónica del radiador, para así poder medir y marcar la posición de los agujeros. Para ello se utiliza un calibre que raya sobre un mármol de planitud de tal manera que se marca la pieza en dos ejes, mediante las cotas proporcionadas en la documentación.

En la intersección de ambas debe realizarse la operación de taladro. Posteriormente se utiliza un granete, para marcar en dicha intersección la localización de la operación de taladrado.

Se elige una broca adecuada a las especificaciones del plano y el material de la pieza, y finalmente se utiliza el taladro de columna para ejecutar los agujeros. Este paso implica amarrar la pieza en una mordaza específica para perforaciones, y aplicar presión suave y uniforme permitiendo que sea la broca la que arranque material. En este caso

al ser una pieza de aluminio es bastante más blanda que la broca, la temperatura no es un factor preocupante.

Además, las velocidades de corte y avance de la broca son mucho mayores a las que se requieren para una operación única como la que nos ocupa.

Finalmente se verifica mediante un pie de rey que los orificios recién mecanizados están localizados en los puntos correctos.

A continuación, se procede al montaje de la pieza radiador en la máquina, fijando también la placa electrónica. Después se prueba el funcionamiento de la cinta ergométrica.

Sin carga funciona indefinidamente, Sin embargo, cuando se añade carga la cinta rodante tiene problemas para mantener la velocidad y finalmente se detiene. Tras detenerse señala un error mediante un indicador rojo e impide el arranque.

Podría tratarse de un problema mecánico ya que puede que le falte lubricación a la cinta de vinilo que presionada contra el soporte por el usuario actuaría como un freno improvisado. También es posible que el variador esté limitado para una corriente muy pequeña que impida que el sistema evolucione de forma correcta en el tiempo en carga.

Luego se realiza el ajuste de los potenciómetros de regulación del variador, el motor produce más par, de tal manera que la cinta rueda sin problema con un usuario encima ya sea caminando o corriendo.

Sin embargo, existe fricción mecánica, que provoca que al pisar fuerte, por ejemplo al correr cuando la presión sobre la cinta es más elevada se produce un efecto que frena la banda incluso hasta la parada completa. Las causas que se barajan son una falta de lubricación, y falta de tensión en la banda.

En el segundo caso, si la banda ha superado su vida útil, es decir si su perímetro ha aumentado más del 110% del original, cabe la posibilidad de que no sea posible aumentar la tensión de la cinta correctamente. Aunque este no es el caso de la cinta ergométrica que nos ocupa.

Por último, se aumenta la tensión de la cinta, dando una vuelta y media a cada uno de los tornillos de ajuste de la banda de rodadura. Así se incrementa la tensión de la banda de rodadura, y además de forma simétrica, lo que evita que tienda a salirse por los extremos del rodillo. Luego se comprueba la transmisión, de tal manera que al bloquear la cinta también se bloquea el motor. Es decir, la transmisión entre la banda y el motor es ahora correcta. Para finalizar se vuelve a emplazar la tornillería en su posición original.

Dado que ahora la cinta vuelve a ser operativa como dispositivo deportivo, se puede dar por concluida la fase de implementación de la restauración. Sin embargo, habiendo resuelto el problema de la cinta, el fenómeno, no se le ha dado solución a la causa raíz. Por lo tanto, cabe ampliar el estudio.

## 3.2. ACONDICIONAMIENTO PARA CINESIOTERAPIA DE LA MARCHA

Una vez esclarecidas las averías, así como los procesos mayoritarios que conducen a ellas. Cabe preguntar, dado el caso de uso en el que se emplea el dispositivo, si es posible disminuir el impacto negativo que ejercen dichos procesos sobre el estado de funcionamiento nominal del sistema.

Esto se consigue mediante la optimización e incorporación de medidas fundamentadas en los datos e información obtenida sobre los noúmenos causantes de los fenómenos indeseados.

Para llevar a cabo esta parte del desarrollo se empleará de nuevo el método en V, lo que demuestra la flexibilidad de este para adaptarse a distintos tipos de ejecuciones. Además, resulta adecuado puesto que se ajusta, como ya se ha comentado, al carácter iterativo de los procesos implicados.

Por otra parte, cabe destacar que, en el caso de uso de cinesioterapia de la marcha, la cinta ergométrica se utiliza principalmente para caminar. Este hecho repercute en los componentes, ya que se genera una carga significativamente distinta en los elementos del aparato. Cambiando entre otros su componente frecuencial.

Además, es posible que durante la fase de diseño no se contemplara adecuadamente el uso exclusivo de la máquina a baja velocidad. Y que la duración de sus componentes se vea reducida por este motivo.

### *3.2.1. Análisis de requisitos y especificaciones*

La cinta ergométrica en el caso de uso de cinesioterapia de la marcha para rehabilitación, se usa principalmente para bajas velocidades. Por consiguiente, los componentes operan en el margen de su régimen nominal.

Esto puede suponer un esfuerzo, en especial térmico, más allá del ordinario que acorte la vida útil del dispositivo. Por ello sería conveniente adaptar el diseño al uso como cinta de rehabilitación.

Esto se lograría mediante el uso de componentes con características máximas mayores (sobredimensionándolos), también mediante técnicas de refrigeración más eficaces como la ventilación forzada o la inmersión en aceite mineral.

Se plantea como hipótesis que la cinta no se encuentra en un estado óptimo de funcionamiento cuando se utiliza en régimen lento para actividades de rehabilitación y fisioterapia de la marcha.

Debido a que se ha diseñado con la función principal de que el usuario corra a cierta velocidad sobre ella. Por ello el medio de refrigeración principal propuesto por el fabricante de la máquina, es un ventilador acoplado en el eje del motor

Esto provoca que cuando el movimiento del usuario es caminar, la cinta y por tanto el eje del motor giran más despacio, y por tanto el flujo de aire hacia el variador de potencia es pequeño.

Y aunque la energía que manejan los circuitos de potencia es menor cuanto menor es la velocidad y la carga, la refrigeración es mucho menor. Un uso prolongado de la máquina en este régimen puede provocar el fallo prematuro de los componentes electrónicos debido a su escasa refrigeración.

Con esta hipótesis, mediante un estudio termográfico cualitativo que relacione el calor presente en el circuito, y comparando los regímenes correspondientes a caminar

y correr respectivamente. Se quiere comprobar si el régimen de refrigeración presente por defecto es suficiente.

En caso de que se obtengan datos que indiquen lo contrario se procedería al diseño de una solución de refrigeración adicional. Esto es debido a que la máquina se utiliza la mayor parte del tiempo en velocidades lentas, en el contexto de la fisioterapia y rehabilitación.

Esta actuación consistiría en el diseño de una solución que aumente el flujo de aire cuando el ventilador que está acoplado al eje del motor actúe de manera pobre. Refrigerando escasamente los componentes, provocando un mayor estrés térmico sobre ellos.

Dicha solución de refrigeración requiere una fuente de energía y posiblemente un método de control que evite el consumo innecesario de energía. Para la elaboración de unas conclusiones adecuadas, se deben obtener unos resultados claros y estos a su vez provienen de un método científico de estudio. Por lo tanto, se realizarán una serie de ensayos como los que se indican a continuación.

Tipo de ensayo	Duración	Velocidad
<b>En vacío</b>	5 min	3 km/h
<b>En vacío</b>	5 min	13 km/h
<b>En vacío</b>	30 min	3 km/h
<b>En Vacío</b>	30 min	13 km/h
<b>En Carga</b>	30 min	3 km/h
<b>En Carga</b>	30 min	13 km/h



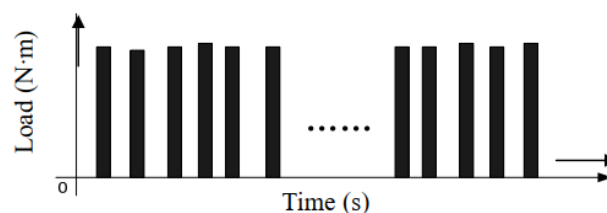
Estos ensayos comparan la dispersión de calor de la placa de potencia a diferentes velocidades, tanto en vacío como en carga, así como en diferentes periodos de tiempo de funcionamiento.

Por consecuencia deberían arrojar luz acerca del comportamiento térmico de la cinta en diferentes situaciones de carga. Al finalizar cada una de estas pruebas se realiza una termografía de los puntos de interés, para luego comparar y analizar los datos de temperatura, en especial las máximas en los puntos críticos.

### 3.2.2. Análisis funcional

Una cinta ergométrica en aplicaciones de fisioterapia y cinesioterapia de la marcha tiene esencialmente los mismos componentes que una cinta ergométrica deportiva. Aunque están sometidos a esfuerzos distintos.

Durante la carrera en cinta ergométrica los pies de una persona tocan alternativamente la cinta. Esta pose determina que la carga en el eje propulsor de las cintas ergométricas bajo el movimiento ideal es una carga impulsional.



*Ilustración 76 - Relación de la carga a lo largo del tiempo. fuente: (Zhang, Li, & Wang, 2006)*

La carga es prácticamente una función periódica en el tiempo y su valor no cambia significativamente (Zhang et al., 2006). Al cambiar la velocidad de marcha cambia la componente frecuencial de la marcha. Además, en usuarios con anomalías de la marcha, la carga puede tener periodos diferentes, por ejemplo, en el caso de que la cadencia de cada una de las piernas sea distinta.

En el caso de uso deportivo, los protocolos de ejercicio pueden indicar al usuario diferentes velocidades de entrenamiento. Entre ellas caminar durante unos minutos, seguido de una sesión de marcha más alegre.

Es habitual que una cinta ergométrica se use para una sesión de carrera deportiva de una duración no muy extensa. El usuario siguiendo un protocolo de entrenamiento exigente, se cansará antes de que la máquina sufra un gran estrés térmico.

El dispositivo cuenta con un mecanismo de refrigeración que consiste en un ventilador cuya propulsión proviene del eje del motor que a su vez mueve la banda de rodadura.

Así se establece una relación íntima entre la capacidad de evacuación del calor y la velocidad de avance de la cinta. En consecuencia, resulta difícil obtener una solución óptima de refrigeración.

Esto es porque, en el caso más favorable para los componentes electrónicos, en algunas zonas de trabajo se tendrá una capacidad sobredimensionada, mientras que en otras la capacidad será justa.

En un escenario más realista, en el que se aplica reducción de costes, es probable que haya un punto medio óptimo. Por encima de este habrá exceso de capacidad, y lo que es más preocupante: por debajo del óptimo la capacidad de refrigeración será deficiente.

### 3.2.3. Arquitectura del sistema

Dado que las necesidades de refrigeración no varían de manera proporcional al régimen de frecuencia angular del motor, se establece que habrá periodos en los que la refrigeración no será adecuada para algunos componentes.

Aquellos más perjudicados serán los que tienen relación directa con la carga que solicita potencia mecánica transmitida a la cinta. Es decir, el propio motor, encargado de convertir la energía eléctrica en su equivalente mecánico menos unas pérdidas.

Por tanto, sucede lo mismo en los componentes que suministran dicha energía al motor. Los de la rama de potencia, y en particular el interruptor estático. Este componente conmuta grandes cantidades de corriente varios miles de veces por segundo.

Su eficiencia es notablemente alta, sin embargo, se producen pequeñas pérdidas que se manifiestan en forma de calor en la unión entre los cristales de silicio con distintos tipos de dopajes químicos.

La unión puede soportar incrementos de temperatura hasta un valor máximo que el fabricante ha caracterizado y que en el caso del IGBT (G30N60) que nos ocupa, es de 150 °C. Si se supera la temperatura máxima en la unión se pueden producir daños irreversibles, quedando en este caso el componente listo para su reciclaje adecuado.

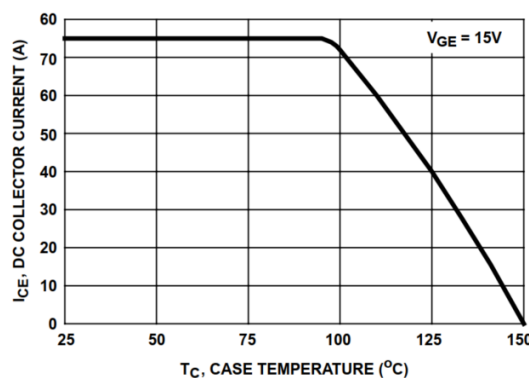


Ilustración 77 - Corriente de colector  $I_{ce}$  en función de la temperatura de la carcasa.  
fuente: Intersil.

Cabe destacar que la temperatura en la unión de un semiconductor es un parámetro difícil de medir en la práctica. Sin embargo, el fabricante, en la hoja de datos técnicos, provee una serie de impedancias térmicas equivalentes.

A continuación, se puede proceder al cálculo de la temperatura de la unión, a partir de la temperatura medida en la superficie del componente. Si se considera necesario.

Lo normal es diseñar de tal forma que los componentes se encuentran alejados de sus *maximum ratings*, que son los valores máximos admisibles para un parámetro en cuestión.

Esto es porque, aunque a corto plazo solicitar esfuerzos cerca del máximo del componente no tiene por qué dañarlo, salvo excepciones. Sin embargo, la operación prolongada cercana a estos límites constructivos somete los componentes a un estrés alto que va en detrimento de su vida útil.

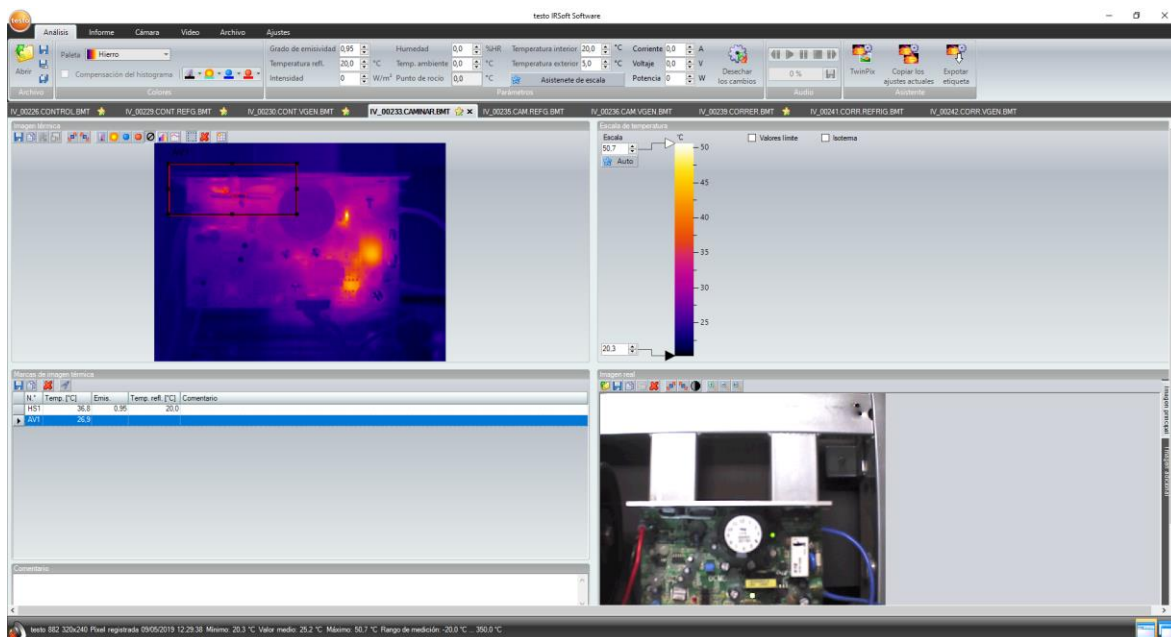
Este problema, desde un punto de vista holístico, puede tener diversas soluciones. Cabe destacar entre otras, sobredimensionar el componente aplicando mayores coeficientes de seguridad para un parámetro dado; hasta reducir mediante la técnica adecuada el estrés que sufre el componente.

Estas acciones, llevadas a cabo adecuadamente, favorecen la durabilidad de los componentes y la fiabilidad del sistema al que pertenecen.

### 3.2.4. Implementación

A continuación, hacemos un ensayo preliminar para intentar demostrar que los componentes sufren temperaturas mayores a menor velocidad de rodadura, debido a la refrigeración deficiente. Este ensayo consiste en que un sujeto camine durante 5 minutos sobre la cinta a velocidad lenta.

Después, durante un tiempo similar el sujeto corre sobre la cinta. Tras cada uno de estos eventos, se realiza una termografía del variador del motor. El procedimiento de medida consiste en calibrar el aparato con un termopar, comprobamos que la medida, en régimen cuasi estático, del termopar coincide con los datos obtenidos por termografía infrarroja para el mismo punto.



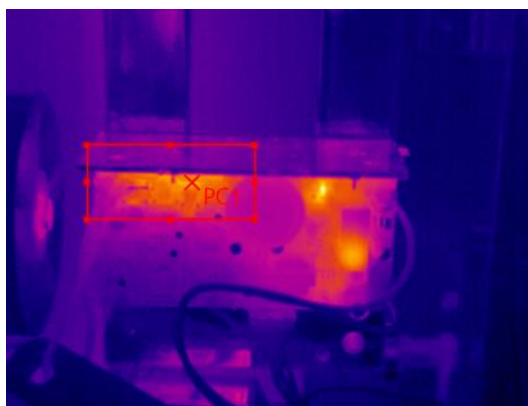
*Ilustración 78 - Interfaz gráfica de usuario de Testo IRsoft. El software utilizado para la interpretación de los datos de termografía infrarroja.*

Capturamos los datos y los analizamos con un software que sea capaz de leer mapas de bits. En este caso el fabricante provee uno especializado, pero también se podrían tratar los datos con Matlab o su contraparte de código abierto Octave, entre otros.

Seleccionamos un conjunto de datos de interés y calculamos el máximo. Por supuesto la zona delimitada corresponde a la rama de potencia, en la placa electrónica principal. Ahora hacemos lo mismo con las medidas sucesivas, de esta manera se obtiene de forma consistente el dato de temperatura máxima en el área de utilidad.



*Ilustración 79 - Representación de los datos de termografía infrarroja correspondientes a caminar durante 5 minutos, con una temperatura máxima en el área de interés de 34,9 °C.*



*Ilustración 80 - Datos termográficos capturados tras correr durante 5 min. La temperatura máxima en la zona de interés es de 34,5 °C.*

Tiempo: t = 5 min.	Caminar	Correr
T Max. (°C)	34.9	34.5

Utilizando un programa de cálculo numérico con capacidades gráficas, se puede obtener una representación que ayude a poner en contexto los datos. En este caso se

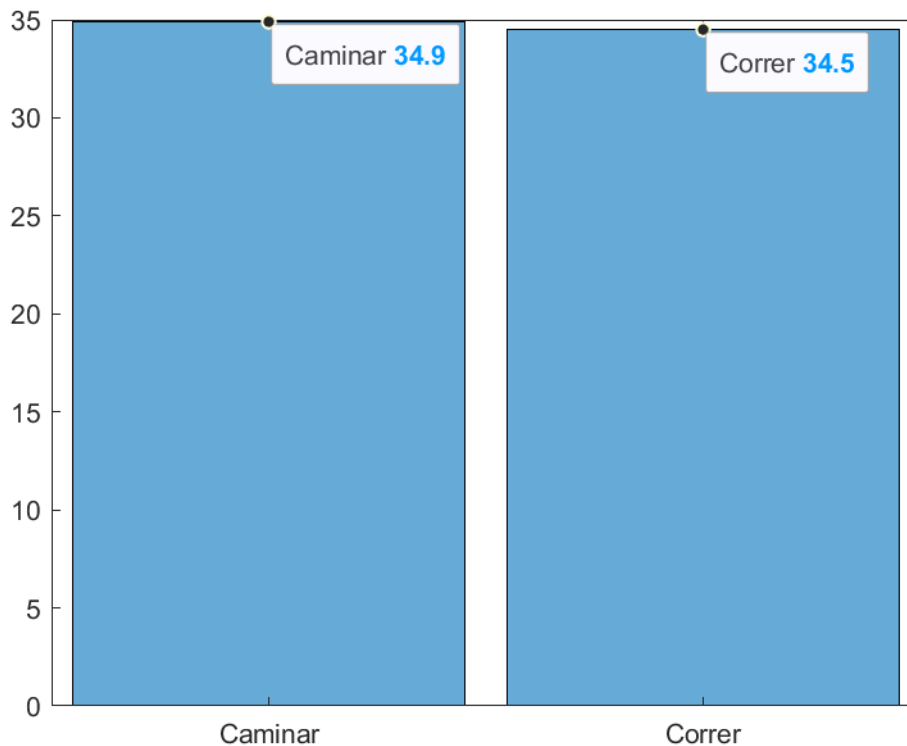
## Desarrollo

utiliza una licencia de prueba de Matlab. La orden utilizada es `histogram(X)` donde X es el conjunto de datos representado como un vector bidimensional.

```
1 - X = [34.9 34.5];  
2 - C = {'Caminar', 'Correr'};  
3 - figure  
4 - histogram('Categories',C,'BinCounts',X);  
5
```

*Ilustración 81 - Extracto de código para la representación gráfica de los datos.*

Se establecen los valores en el vector X y las categorías en la variable C. Esta técnica concreta sirve para la representación de datos ordenados en vectores / matrices, por categorías.



*Ilustración 82 - Histograma de temperaturas en la etapa de potencia. El eje Y representa la temperatura en grados centígrados.*

Obtenemos un diagrama representativo de las temperaturas máximas en la etapa de potencia, respecto a la actividad realizada con la máquina durante el mismo tiempo. Este sencillo ejemplo ilustra el proceso de tratamiento de datos que se lleva a cabo para el análisis de las temperaturas obtenidas por la técnica de termografía infrarroja.



Los datos en si mismos no son concluyentes, puesto que el tamaño muestral es pequeño y además hay una reducción de tan solo 0,4°C entre el punto más caliente de la superficie del interruptor estático cuando la cinta se usa para correr en lugar de caminar.

La hipótesis al respecto es que, dado que se aprecia una reducción en la temperatura, tal y como se había planteado en la hipótesis inicial; es posible que la duración del ensayo sea insuficiente.

En otras palabras, es necesario permitir que el calor de la unión atraviese la carcasa hasta que pueda ser percibido por la cámara termográfica o cualquier otro sensor de temperatura adecuado, como un termopar.

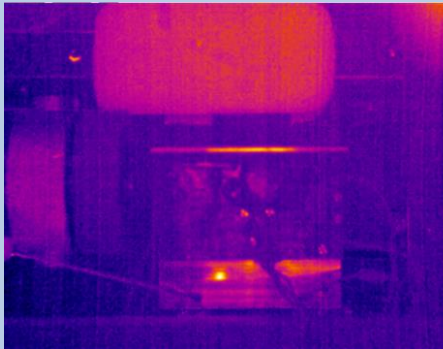

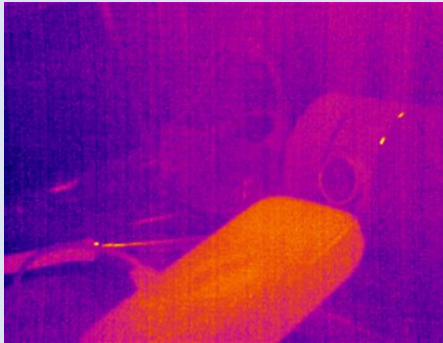
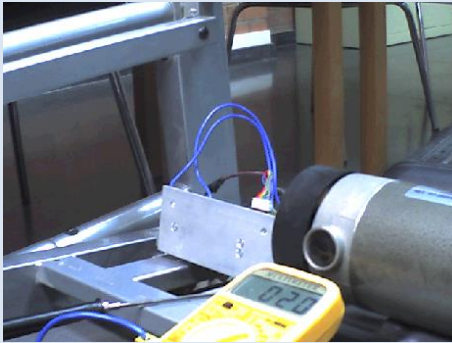
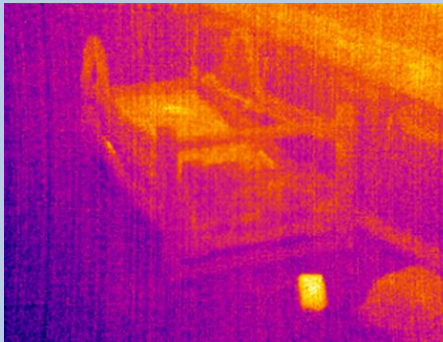
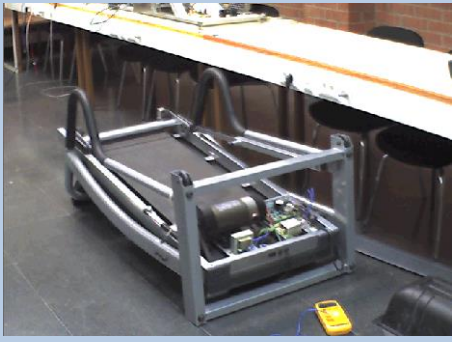
Por este motivo, se realizan más ensayos. Esta vez se aumenta el tiempo de ensayo en un factor de 6, llegando de esta manera a los 30 minutos en funcionamiento.

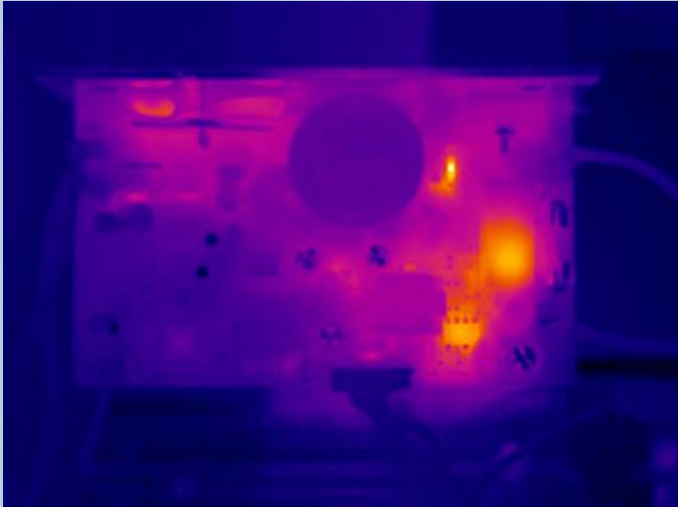
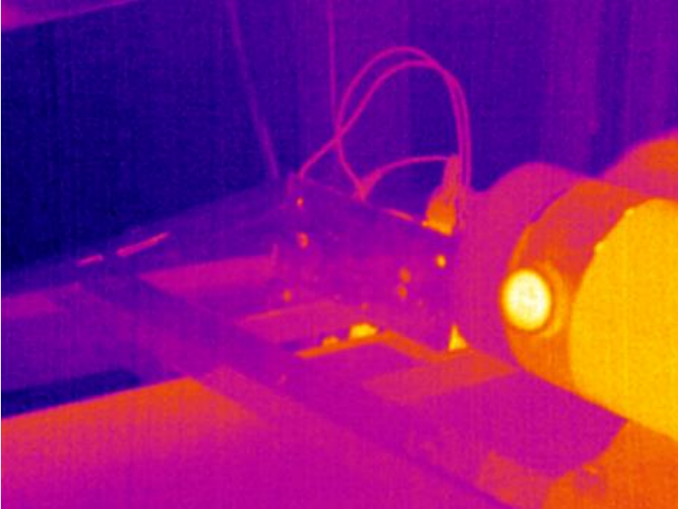
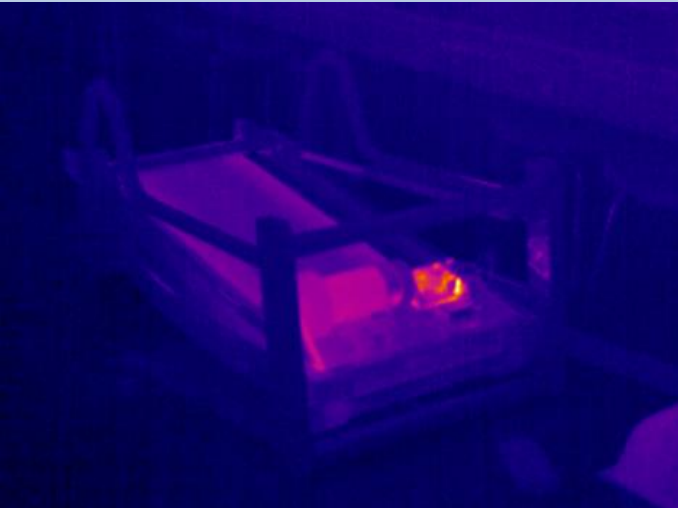
Debido al tedio que supone que un sujeto actúe de carga para la máquina durante dicho periodo de tiempo, se hará un ensayo en vacío. Posteriormente si no hay datos claros, se realizaría el ensayo con un sujeto provocando una situación de carga en la máquina.

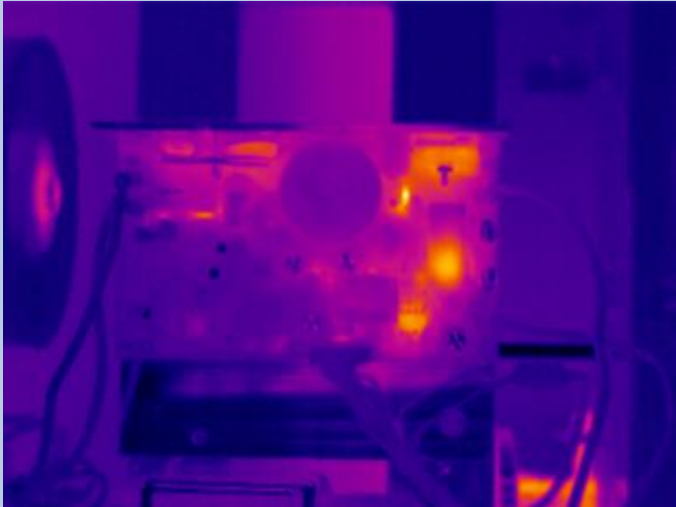
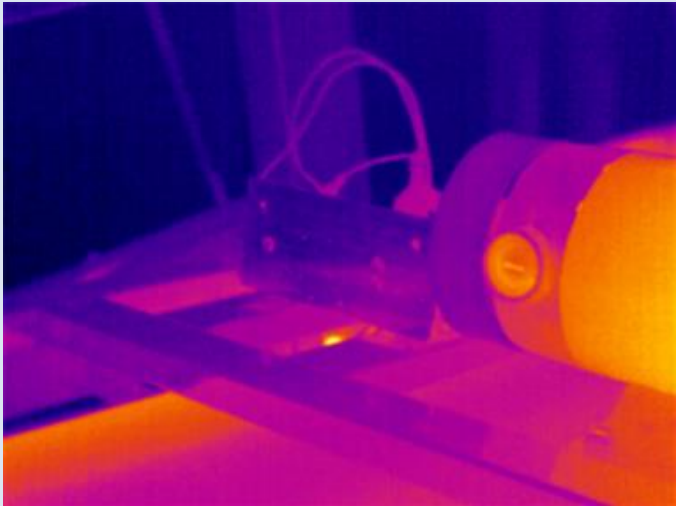

Además, se colocarán todos los armazones y paneles durante el funcionamiento para que el ensayo sea más realista, estudiando el comportamiento térmico en condiciones más parecidas al caso de uso correspondiente.

Se utiliza también un termopar para calibrar la medida de emisividad del material, haciendo que corresponda la medida del termopar con la obtenida por termografía infrarroja en el mismo punto. Además, se medirá con la máquina aún en funcionamiento, retirando cuidadosamente el armazón la tapa que cubre la zona de interés.

La velocidad se establece en 3km/h para caminar lento y 13 km/h para correr. Se harán termografías del variador, el refrigerador y una general de la máquina. Una de control con la máquina en reposo, a baja velocidad y otra a alta velocidad.

TIR en vacío	Control	Luminancia y crominancia en el canal visible
<p><b>Componentes electrónicos</b></p>		
<p><b>Chasis Refrigeración</b></p>		
<p><b>Vista General</b></p>		

<b>TIR en vacío</b>	<b>Caminando</b>
<b>Componentes electrónicos</b>	
<b>Chasis Refrigeración</b>	
<b>Vista General</b>	

TIR en vacío	Corriendo
<b>Componentes electrónicos</b>	
<b>Chasis Refrigeración</b>	
<b>Vista General</b>	

En la representación de los datos se pueden hacer observaciones cualitativas. Algunas de ellas son las siguientes. La cinta y sus componentes, tras haber estado en reposo prolongadamente tienen temperaturas muy homogéneas ya que su calor se ha equilibrado con el del ambiente. Se observa en las termografías infrarrojas de control.

A mayor velocidad, como es de esperar, la temperatura de algunos elementos móviles se acentúa. Es el caso de la correa de transmisión. Que incluso produce un aumento visible de la temperatura del armazón al final del ensayo a mayor velocidad.

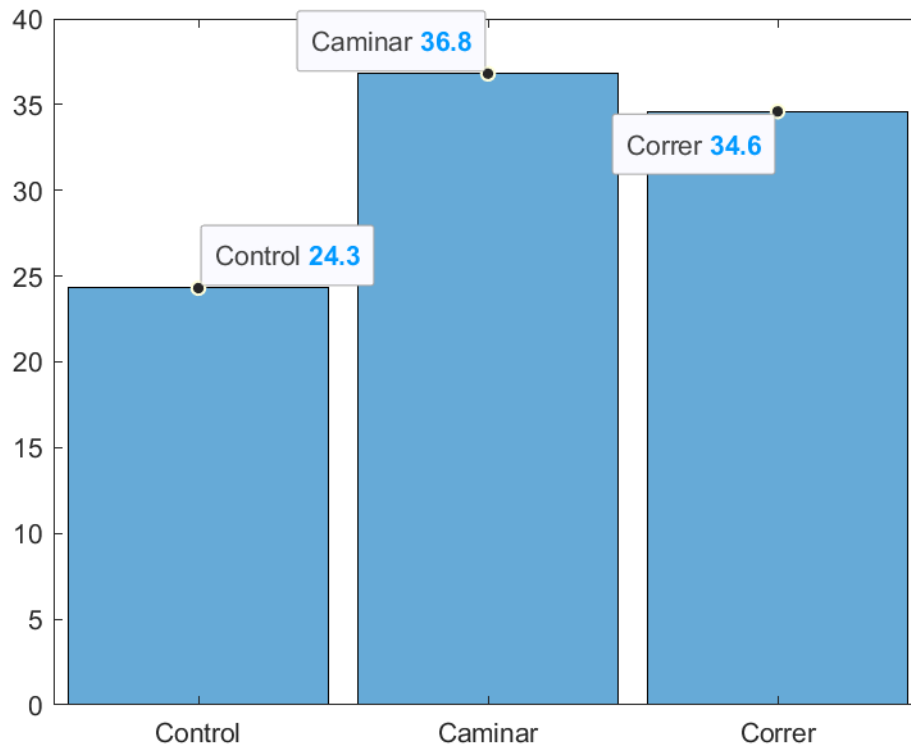
Otros elementos como las escobillas del motor, y la rama de potencia muestran resultados distintos. Nos centraremos en los elementos electrónicos, puesto que son más desfavorables. El aumento de temperatura es más crítico en ellos.

Por eso a continuación se hace un análisis cuantitativo de los datos mediante el mismo procedimiento utilizado en el ensayo preliminar.

<b>TIR en vacío</b>	<b>T. Máx (°C)</b>	<b>T. media (°C)</b>
<b>Control</b>	24.3	20.7
<b>Caminando</b>	36.8	26.9
<b>Corriendo</b>	34.6	27.1

Tras la realización de ensayos más prolongados, se acentúa la diferencia entre los regímenes de caminar y correr. Sin embargo, la diferencia no es tan grande como para afirmar completa y rotundamente que el proceso de refrigeración varía a un régimen distinto que la generación de calor. Y por tanto que el régimen más lento de funcionamiento es más desfavorable térmicamente para los componentes electrónicos.

## Desarrollo



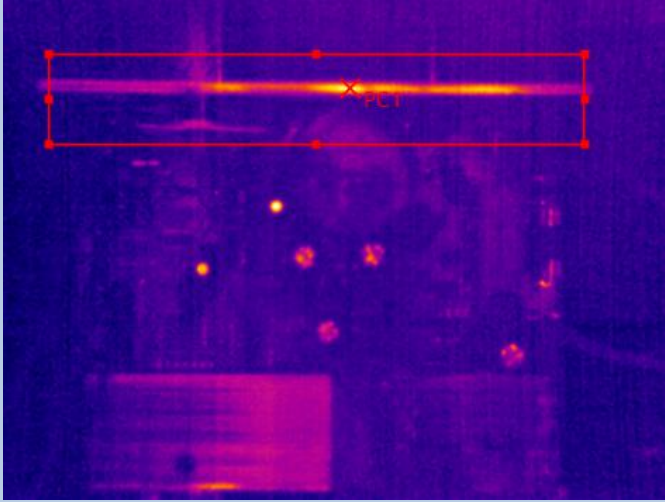
*Ilustración 83 - Comparación de la temperatura máxima medida en la rama de potencia, tras el funcionamiento en vacío durante 30 minutos a diferentes regímenes.*

Así que a continuación se realizan ensayos igual de prolongados, aunque en esta ocasión la cinta es utilizada por un usuario, tanto para caminar como para correr.

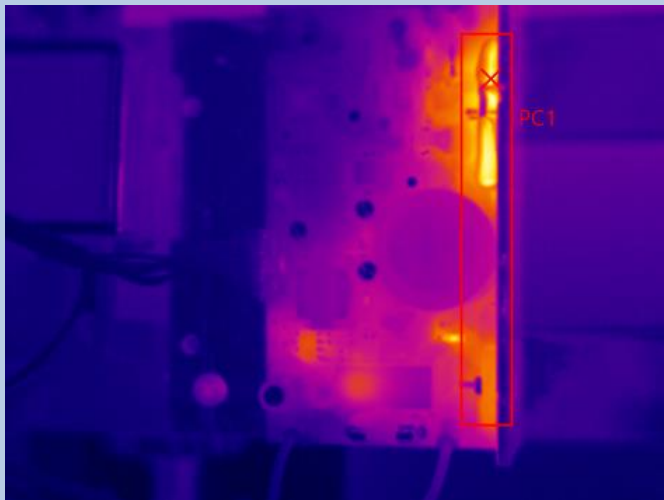
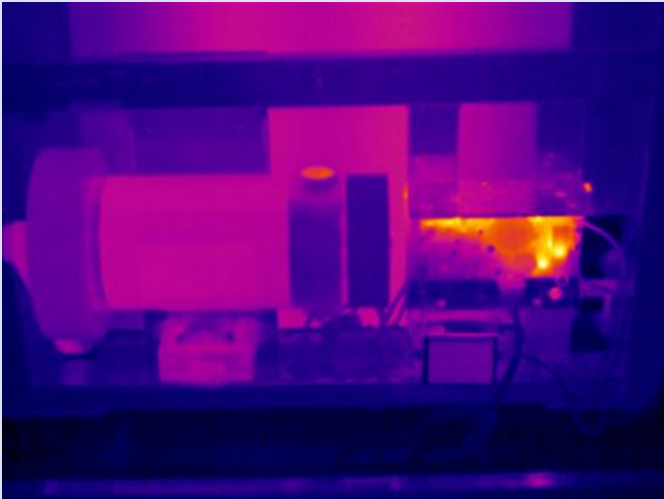
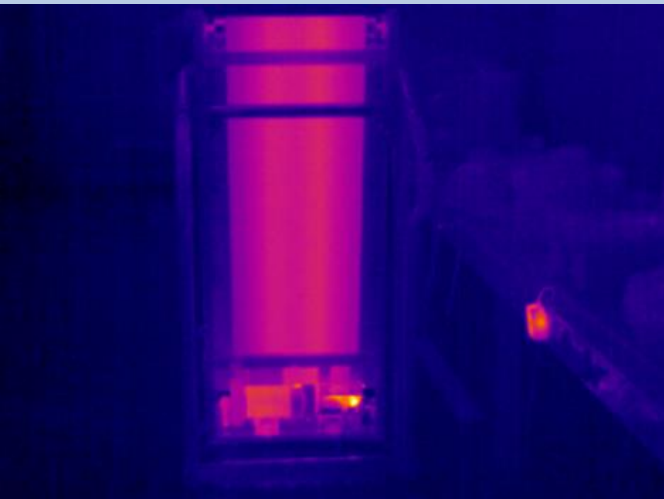
En estas condiciones la hipótesis es que se acentuará el comportamiento térmico descrito, debido a que la rama de potencia estará sometida a un mayor esfuerzo.

Ahora el interruptor estático conmutará mayor potencia. Se produciría más calor que sería evacuado mejor a regímenes más elevados de funcionamiento, aún cuando la generación de calor es un poco mayor.

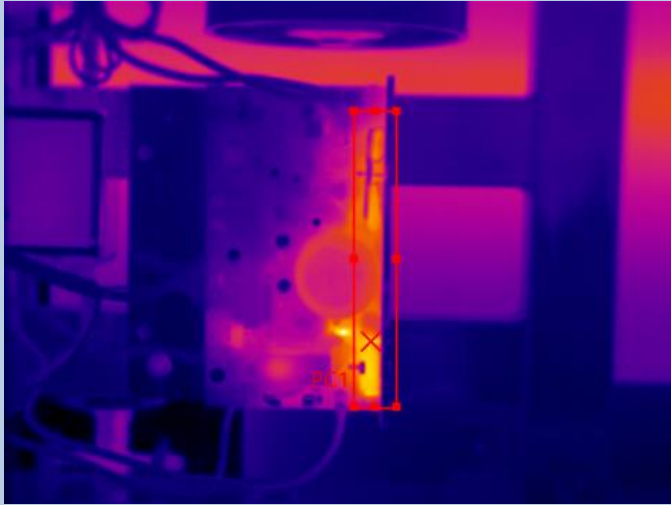
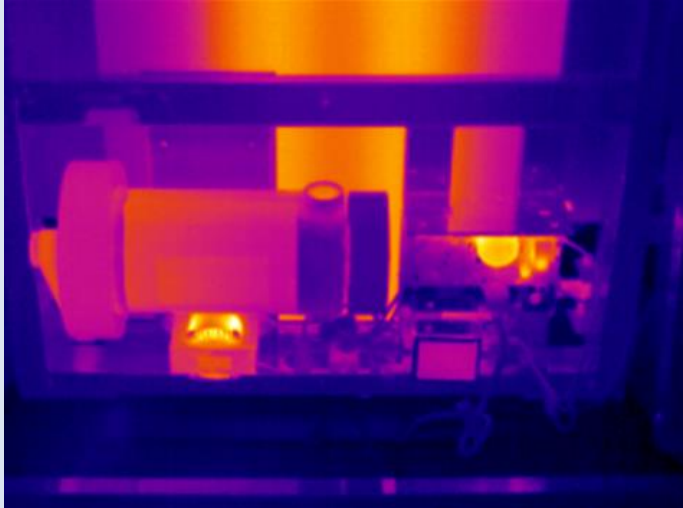
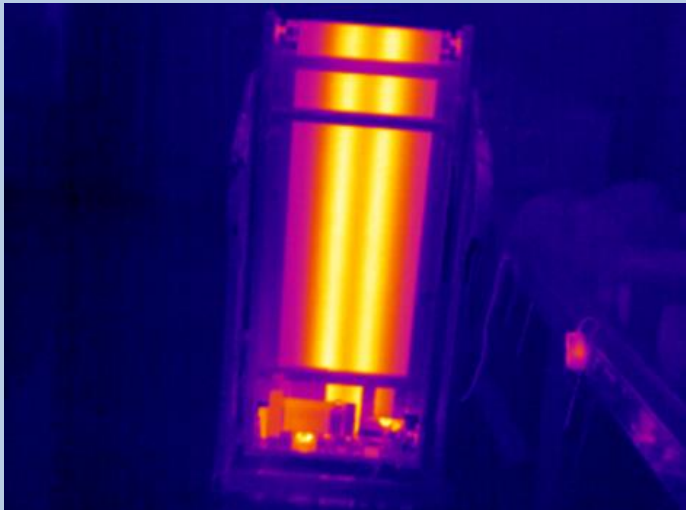
Esto se traduciría en temperaturas superficiales observables mediante termografía infrarroja, más elevadas para los regímenes lentos que para los rápidos.

TIR en carga	Control
Componentes electrónicos	

Tras estar la máquina en reposo durante 24 horas, las temperaturas de esta son homogéneas con el ambiente. La mayor temperatura que se observa es un reflejo del perfil del refrigerador, proviene de las luminarias instaladas en el techo.

TIR en carga	Caminando
<p><b>Componentes electrónicos</b></p>	
<p><b>Chasis Refrigeración</b></p>	
<p><b>Vista General</b></p>	



TIR en carga	Corriendo
<p><b>Componentes electrónicos</b></p>	 <p>A thermal image showing a close-up of electronic components. A red rectangular box highlights a specific area, and a red 'X' marks a point within it. The background is dark, with some blue and green highlights.</p>
<p><b>Chasis Refrigeración</b></p>	 <p>A thermal image showing the internal components of a chassis. The image is dominated by red and orange colors, indicating high temperatures. The components are arranged in a row, and the overall scene is brightly lit.</p>
<p><b>Vista General</b></p>	 <p>A thermal image showing the overall chassis. The image is dominated by red and orange colors, indicating high temperatures. The chassis is shown in a vertical orientation, and the overall scene is brightly lit.</p>

De nuevo, el estudio se centra en la rama de potencia de la placa electrónica. A continuación, se muestran los datos obtenidos.

TIR en carga	T. Máx (°C)	T. media (°C)
<b>Control</b>	28.1	22.4
<b>Caminando</b>	68.8	44.2
<b>Corriendo</b>	63.0	42.8

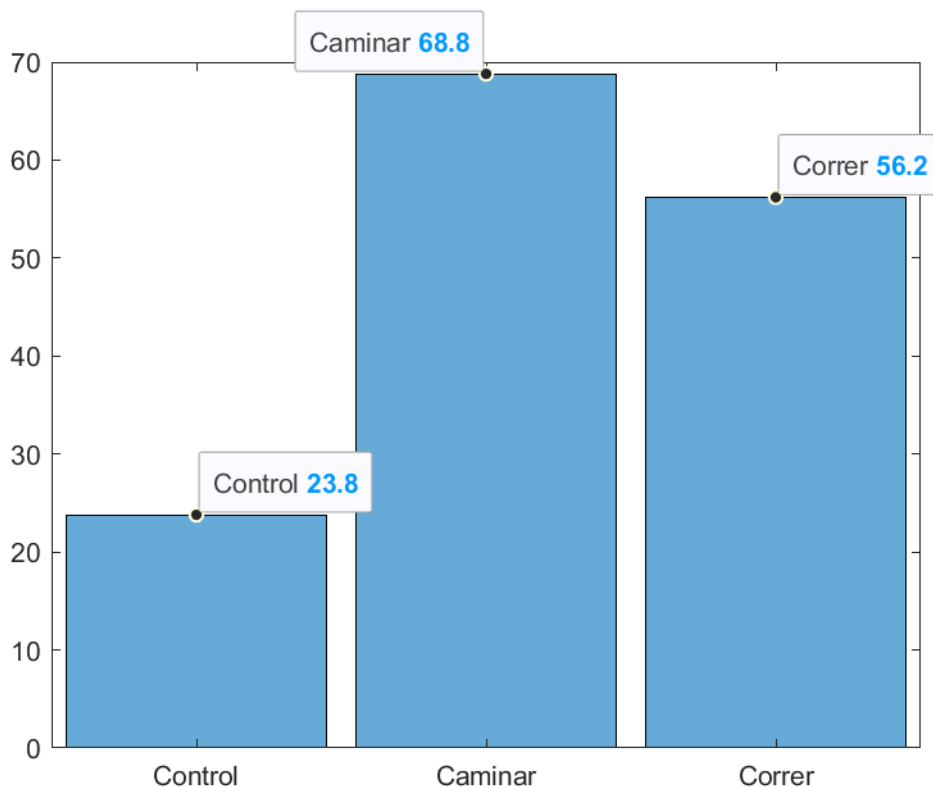
En esta ocasión se repiten los resultados planteados en la hipótesis. La rama de potencia manifiesta un comportamiento térmico, en el que la temperatura desciende a medida que aumenta el régimen de funcionamiento.

Cabe destacar que el punto más caliente de la rama de potencia cambia de los interruptores estáticos, cuando la cinta se usa para caminar; al puente rectificador, elemento que se encuentra más alejado del ventilador.

Sin embargo, si comparamos exclusivamente la zona de los interruptores estáticos el cambio es aún más acusado. A pesar de que hay más energía circulando por la rama de potencia manifiesta una temperatura menor.

TIR Int. estáticos	T. Máx (°C)	T. media (°C)
<b>Control</b>	23.8	22.0
<b>Caminando</b>	68.8	48.2
<b>Corriendo</b>	56.2	42.4

Se observa un descenso de más de 10 grados centígrados en la superficie del componente cuando se aumenta significativamente el régimen de trabajo en carga de la cinta ergométrica. Cuando un usuario corre sobre la cinta es más favorable para los componentes.



*Ilustración 84 - Histograma de temperaturas en °C en el interruptor estático en carga.*

En la representación gráfica se observa una caída en la temperatura cuando el usuario utiliza la cinta para correr. Cabe destacar que esto sucede incluso cuando el ensayo a mayor velocidad se realiza después del más lento.

El ensayo de caminar parte de la temperatura ambiente, mientras que en este caso el ensayo de correr parte de la temperatura más elevada producida por el ensayo anterior.

La máquina ergométrica, en el caso de la cinesioterapia de la marcha se utiliza exclusivamente a bajas velocidades, similares e incluso inferiores a las de ensayo para caminar.

De ahí que, tras la realización de la toma de datos se considere oportuno aumentar la refrigeración cuando el motor se mueve a frecuencia angular relativamente baja. Con el fin de reducir la incidencia de averías relacionadas con el exceso de temperatura en el variador electrónico.

Para ello se agregará un radiador con gran superficie de contacto con el aire, ya que, a diferencia del radiador de serie, este tiene aletas. A dicho radiador se le acopla un ventilador movido por un motor eléctrico independiente, que proporciona un caudal de aire constante en circulación por las aletas.

De esta manera se transmite el calor por un fenómeno de convección. La presencia del ventilador haría pensar que quizás el fenómeno de convección natural se hace menos relevante, dando paso principalmente a un fenómeno de convección forzada.

La instalación de un ventilador independiente requiere una fuente de alimentación. Debido a que se considera inoportuno intervenir el circuito original de la máquina, puesto que, si se toma en consideración que estará dimensionado para alimentar los componentes del diseño original con un coeficiente de seguridad.

La adición de una carga, de tipo óhmico inductiva, podría reducir la vida útil del circuito de serie. Esto es, al hacer que trabaje más cerca de sus índices máximos. Por tanto, se reduciría la estabilidad del sistema y su fiabilidad ante eventualidades por naturaleza imprevistas, que podrían causar una avería.

Por estos motivos se decide diseñar una fuente de alimentación adicional, exclusiva para el ventilador añadido, que se alimentará de un punto de la red, tras superar los filtros de la máquina, evitando así la introducción de ruido electromagnético en la red eléctrica nacional.

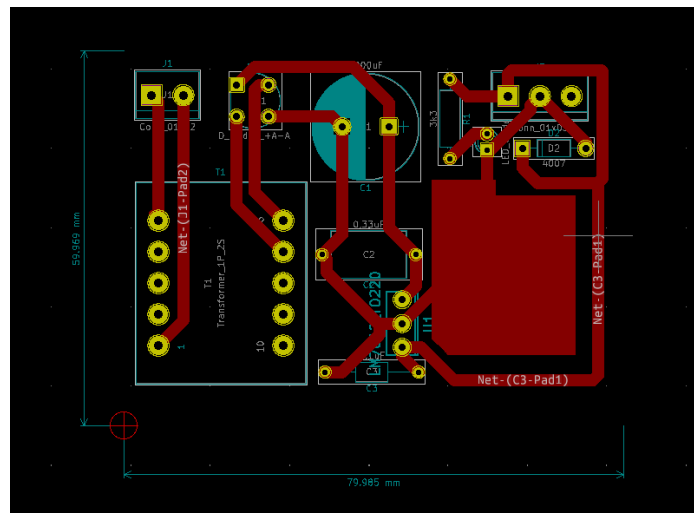
El proceso de desarrollo de un sistema adecuado de refrigeración se va a llevar a cabo siguiendo de nuevo el método en V. Durante la fase de diseño, asistido por ordenador, se realizan las verificaciones e iteraciones pertinentes para asegurar el funcionamiento del dispositivo.

El componente desarrollado consta en sí mismo de una unidad de transformación que reduce en amplitud de la señal sinusoidal de potencia proporcionada por la red. A continuación, se sitúa un puente de rectificación que permite obtener una señal exclusivamente positiva, aunque con un rizado por valor de la amplitud máxima.

Es el momento de filtrar la señal, para ello se emplea un condensador con el que se obtiene una señal que tiene un nivel más estable en el tiempo, con una tensión de rizado mucho menor.

A continuación, se lleva la señal a un regulador de tensión, que como su nombre indica, establece una tensión constante a la salida. Además, es capaz de proporcionar suficiente corriente para la aplicación que nos ocupa.

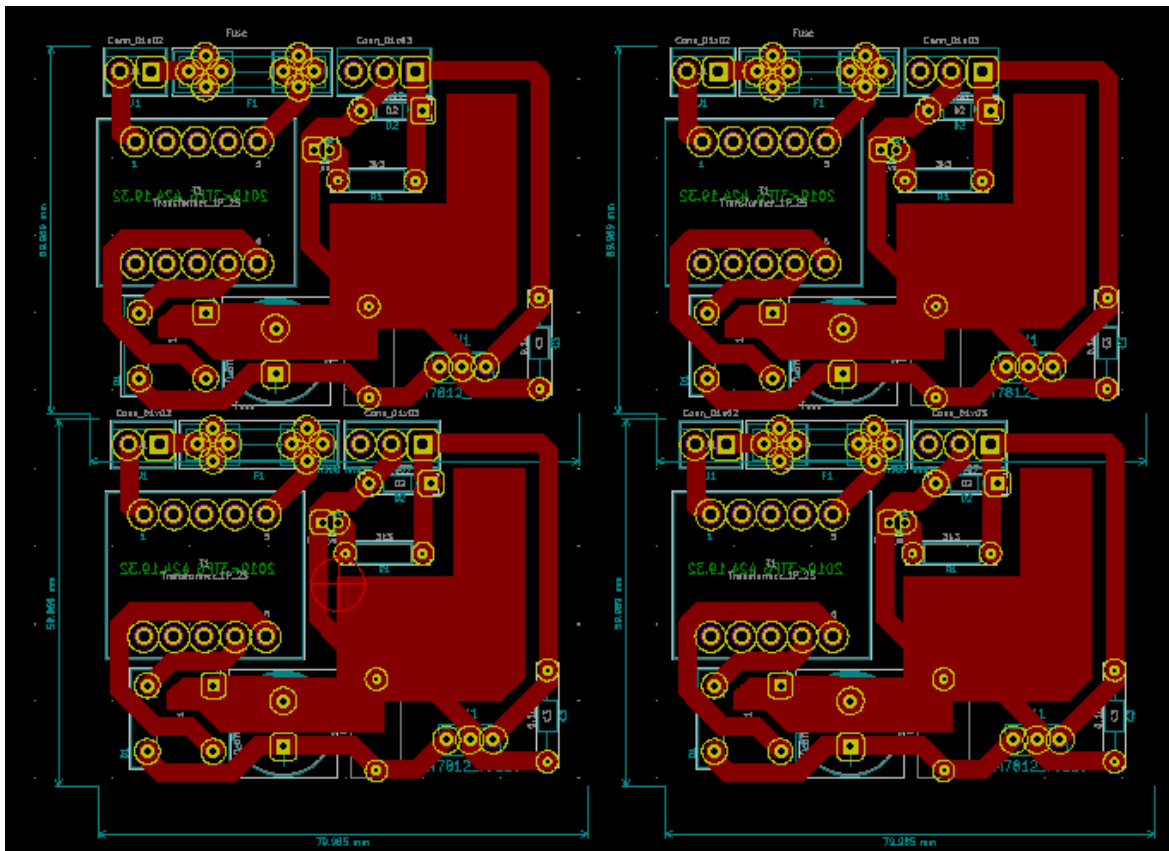
Por último, se añade un indicador luminoso LED con su correspondiente resistencia limitadora, de tal manera que es sencillo conocer el estado operativo de la salida de la fuente. Unos conectores apropiados completan el diseño. Los componentes han sido elegidos en función de su coste y disponibilidad, parámetros que aseguran que se pueda fabricar e implementar en el sistema deportivo.



*Ilustración 85 – Versión preliminar del enrutamiento de los componentes de la fuente de alimentación diseñada para el ventilador auxiliar.*

A continuación, se procede a la fabricación de la placa, para ello es necesaria la generación de unos documentos llamados clichés. Estos contienen la información

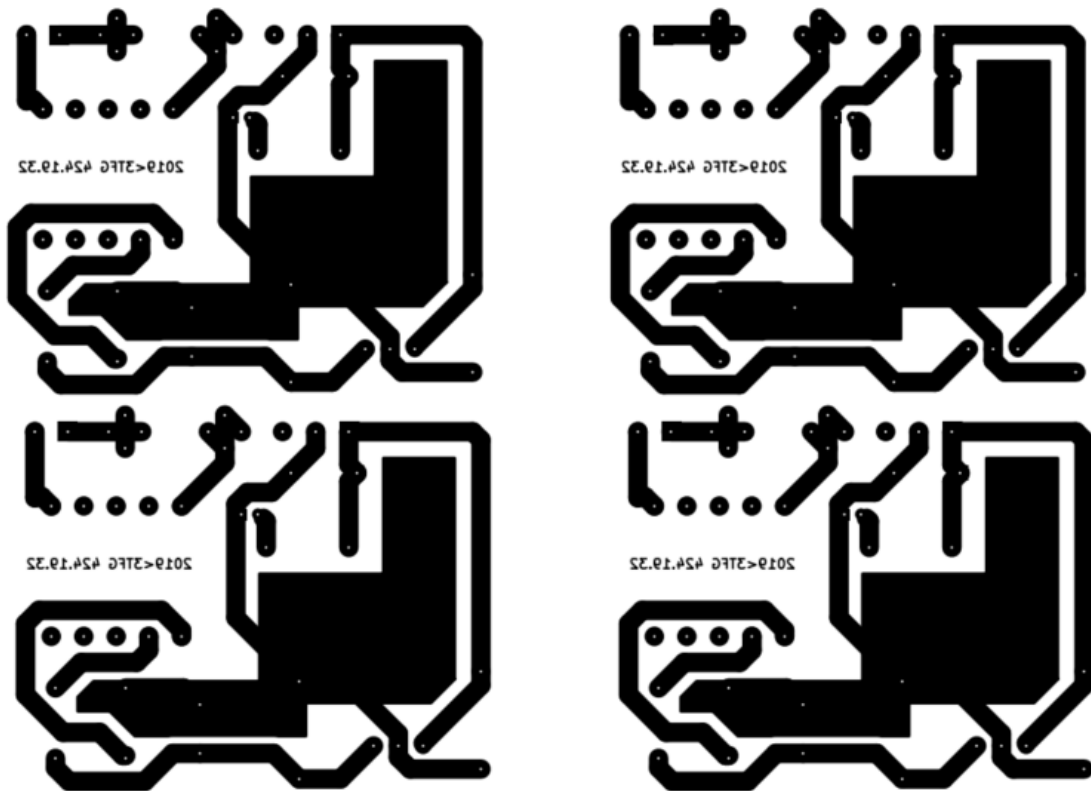
requerida para que su impresión en acetato ayude a dejar una impronta permanente en las PCBs fotosensibles. Dicho proceso se lleva a cabo con luz ultravioleta.



*Ilustración 86 - Versión final del diseño y enrutamiento de la PCB para la refrigeración.*

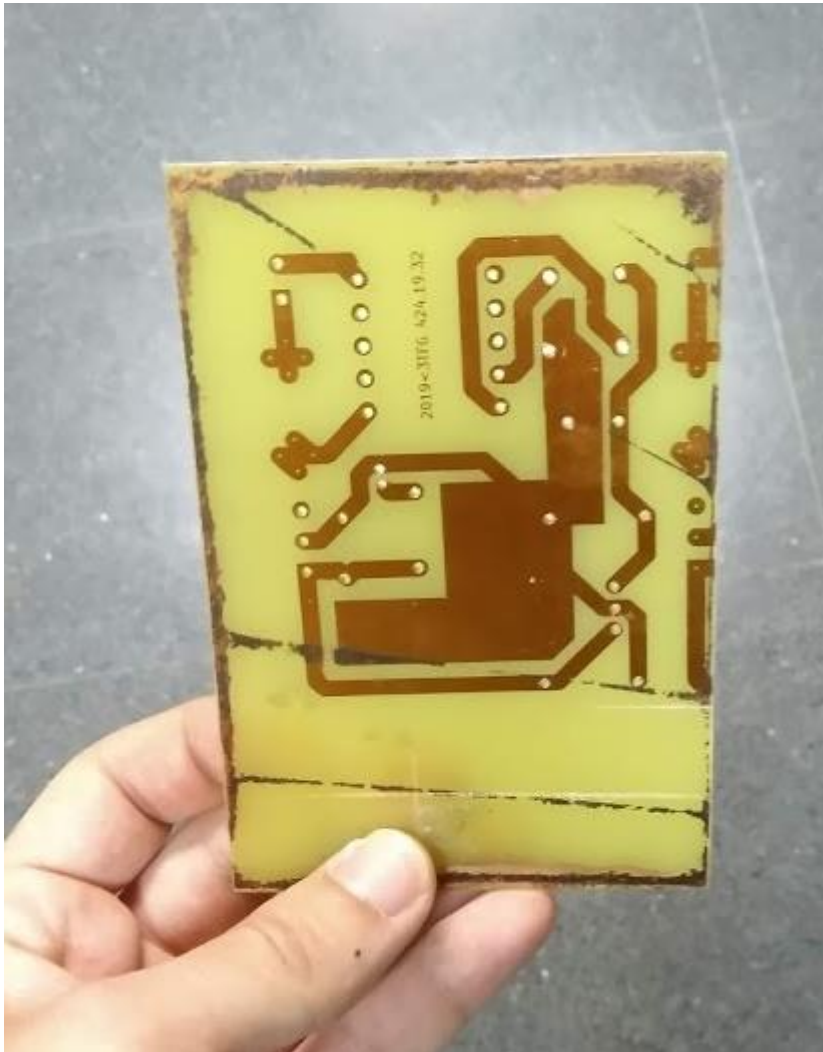
En la versión final del enrutamiento se han optimizado los caminos y aumentado el tamaño de las pistas de acuerdo con coeficientes de seguridad más exigentes. Además, se ha añadido un fusible para aumentar la seguridad en caso de que se produzca un exceso de corriente.

Tras la exposición a la radiación ultravioleta en condiciones de vacío con los clichés sobre impuestos, la placa de cobre está lista para el ataque químico. Este retira el cobre sobrante dejando una fiel imagen del cliché en cobre sobre la PCB.



*Ilustración 87 - clichés para la fabricación de las PCBs.*

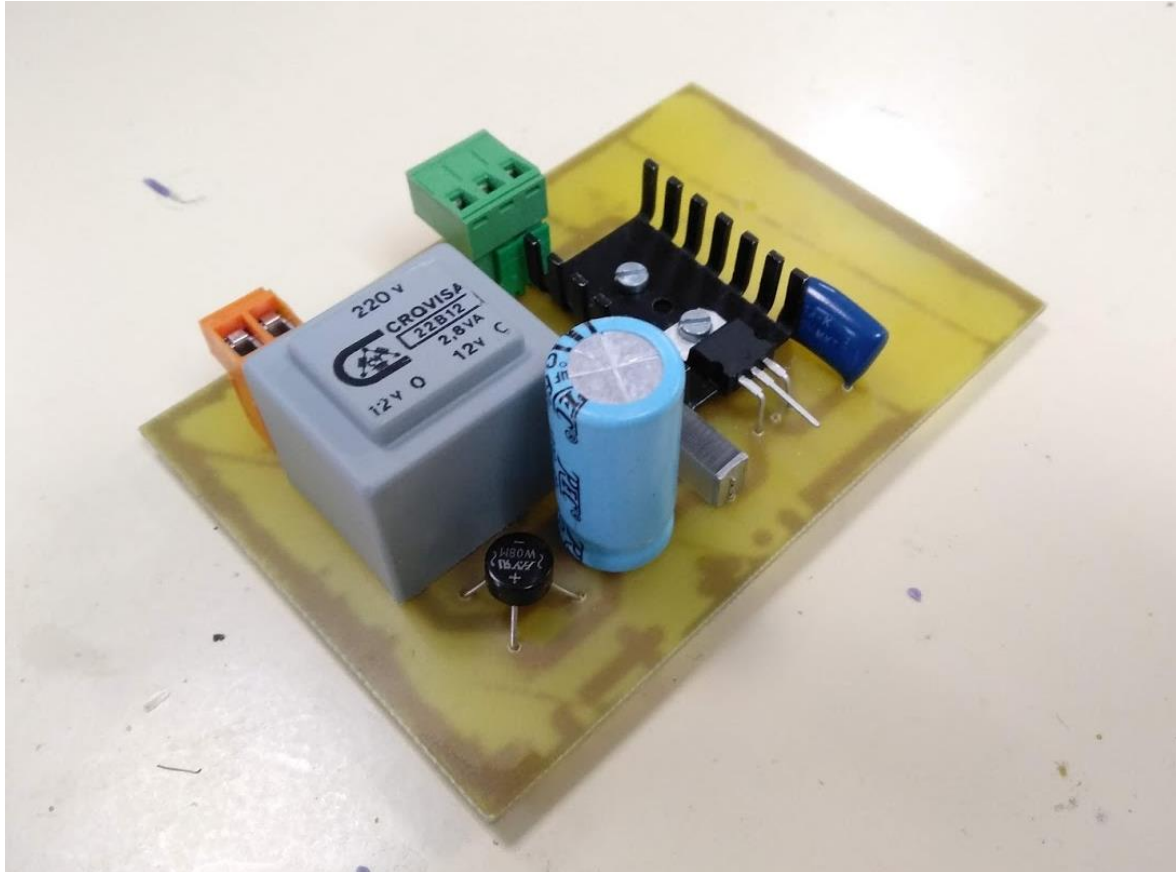
Después del ataque químico se lava la placa, se seca y posteriormente se barniza para evitar que se oxide prematuramente el cobre que compone las pistas. También se comprueba la ausencia de cortocircuitos y otras anomalías que darían al traste con la funcionalidad del componente desarrollado.



*Ilustración 88 - Resultado de la fabricación de la PCB mediante radiación ultravioleta y ataque químico. Se aprecian bandas debido a la edad del material base, aunque es totalmente funcional ya que no hay cortocircuitos ni otras anomalías significativas.*

Como se aprecia en la ilustración, se deben taladrar los puntos en los que se insertarán los componentes. El proceso se ha llevado a cabo en el laboratorio de placas de la EUPLA.





*Ilustración 89 - PCB con los componentes montados y soldados.*

A continuación, se montan y sueldan los componentes cuidadosamente, comprobando que no se producen efectos indeseados como cortocircuitos. Para finalizar se ensambla el dispositivo en su ubicación final dentro del sistema.



*Ilustración 90 - Sistema de refrigeración en su ubicación final.*



Solo falta conectar el ventilador y los cables de alimentación de red. De esta forma al accionar el interruptor de encendido de la máquina, la refrigeración adicional entra inmediatamente en funcionamiento. Lista para mejorar el rendimiento térmico en los regímenes de funcionamiento de la cinta ergométrica más desfavorables. Ayudando a la durabilidad, fiabilidad y disponibilidad del sistema de cinta ergométrica.

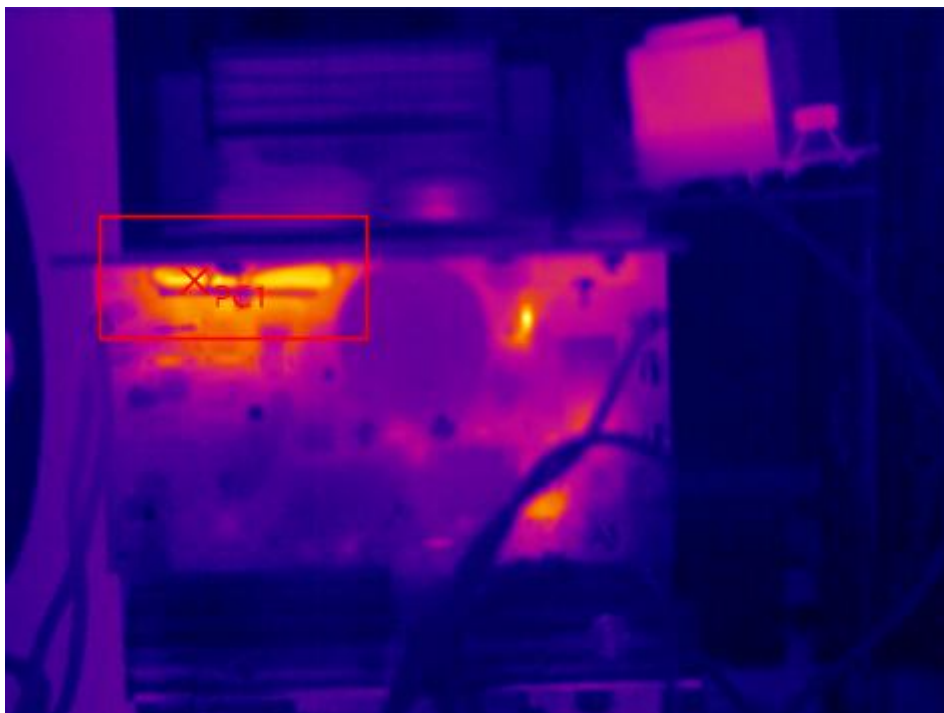
Ahora que se ha llevado a cabo esta actuación, cabe preguntarse si ha sido satisfactoria. Para ello es posible comparar las temperaturas en la superficie de los semiconductores antes y después de la aplicación de la medida. Con el objetivo de observar cambios, preferentemente en la buena dirección.

### 3.2.5. Validación

En este capítulo se describe el proceso de validación de la solución propuesta. Como ya se ha comentado, el caso más desfavorable para la circuitería, y en especial el apartado de potencia, se produce cuando el eje del motor tiene una frecuencia angular pequeña y por lo tanto el flujo de aire provocado por el ventilador incorporado es escaso.

Una vez introducido el elemento de refrigeración autónomo comentado en capítulos anteriores, se estudia el comportamiento térmico mediante la técnica de termografía infrarroja para medir la temperatura en la superficie del interruptor estático y compararla con los resultados anteriores.

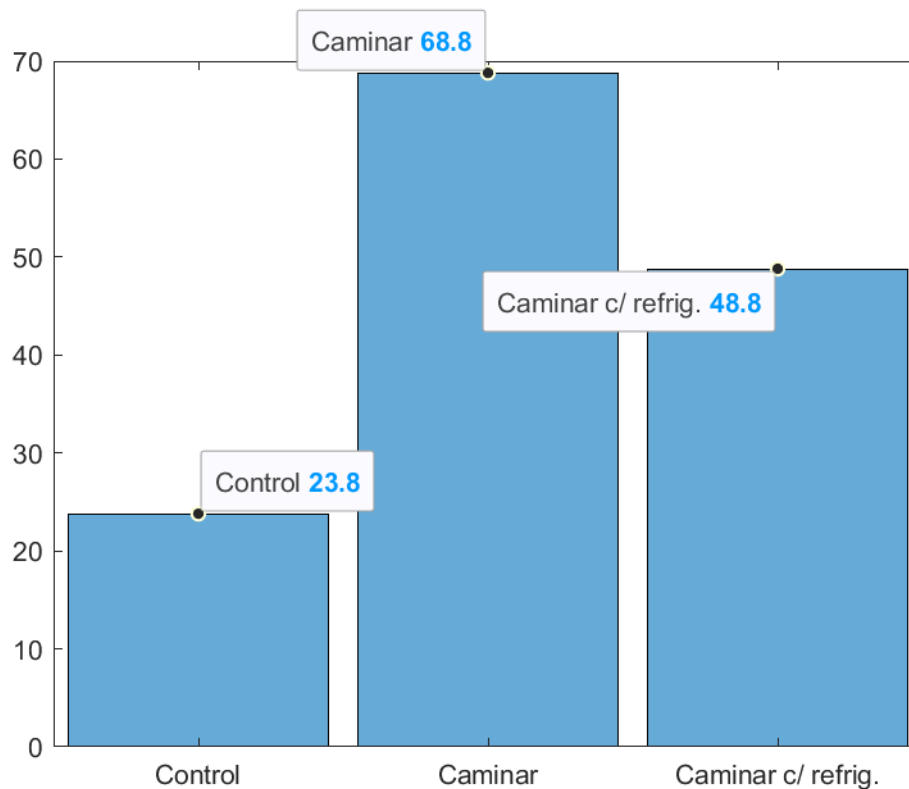
El ensayo se realiza con una duración suficiente y similar a los anteriores para dar tiempo a que se alcancen los regímenes estacionarios y el equilibrio térmico con el ambiente. El régimen de prueba es el más desfavorable (caminar), y el ensayo se realiza en carga, aunque esta vez con la refrigeración adicional actuando.



*Ilustración 91 - Termografía infrarroja de la placa de potencia con la solución de refrigeración instalada, tras un ensayo prolongado en régimen desfavorable.*

TIR con refriger.	T. Máx (°C)	T. media (°C)
Control	23.8	22.0
Sin refrigeración	68.8	48.2
Refrig. instalada	48.8	33.7

Los datos muestran un descenso significativo de la temperatura mientras un usuario camina de manera prolongada en la cinta ergométrica.



*Ilustración 92 - Histograma que compara las temperaturas antes y después de aplicar la solución propuesta, comparadas con una medida de control.*

La representación gráfica muestra un descenso perceptible de la temperatura en el régimen más desfavorable. Con estos resultados se da por concluida la fase de validación de la solución.

A continuación, se retorna la cinta ergométrica a sus propietarios, con las modificaciones aplicadas y lista para su uso.



### 3.3. MODIFICACIÓN

El dispositivo ha sido restaurado y se han aplicado medidas para reducir su desgaste debido al caso de uso en el que opera. Ahora cabe preguntarse, dado el avance de la técnica desde que se produjo el dispositivo, si es posible mejorar la experiencia de usuario con un coste reducido y una implementación sencilla.

Se genera un ecosistema para el desarrollo de futuros trabajos, con los que se fomenta un proceso disruptivo en el que no es necesario producir un nuevo sistema, sino que en su lugar se actualizan las capacidades de sistemas más antiguos cuya función siguen cumpliendo, aunque de forma poco competitiva respecto a otras áreas tecnológicas. En resumen, se trata de acercar la era de la computación barata y ubicua a otros sectores, como el del equipamiento deportivo.

Por tanto, a pesar de que la cinta ergométrica cumple correctamente su función deportiva. Dado el avance de la técnica en diversas áreas de la ingeniería, y especialmente en la informática y la electrónica digital. Es posible actuar sobre los dispositivos ya existentes, actualizando sus capacidades con un coste económico pequeño. Por consiguiente, pueden incorporarse al ecosistema conectado.

El objetivo de esta fase es abrir la puerta y dar pie a futuros trabajos de investigación en esta línea. Para ello se propone un modelo actuación como concepto de ejemplo. Posteriormente se indican los detalles del funcionamiento de los diferentes actores del modelo. De esta manera se sientan las bases para desarrollos más elaborados, que sigan estos principios.

Idealmente, en futuras ocasiones, tecnologías de este tipo pueden ser integradas en la fase de diseño de los productos deportivos. Lo que no excluye que, en algunos nichos y casos de uso, sea conveniente seguir las líneas expuestas a continuación. Modernizando equipamiento que por sus características se desea mantener en servicio en lugar de ser reemplazado por completo.

### *3.3.1. Análisis de requisitos y especificaciones*

Dado que el objetivo es incorporar un dispositivo operacional, aunque obsoleto, a la red. Se sigue el principio de robustez, mediante las intervenciones que minimicen la complejidad de la solución.

Por este motivo se converge hacia tecnologías con amplia aceptación y que aporten cualidades de simplicidad. También se considera importante que la solución demande un bajo consumo eléctrico. Lo que facilita su implementación.

Además, el bajo consumo energético hace posible que el coste de la solución, tanto a nivel energético como económico, no sea un factor frente a los beneficios que aporta. Por este motivo se opta por una solución que utiliza tecnologías compatibles con los dispositivos ampliamente adoptados por los usuarios.

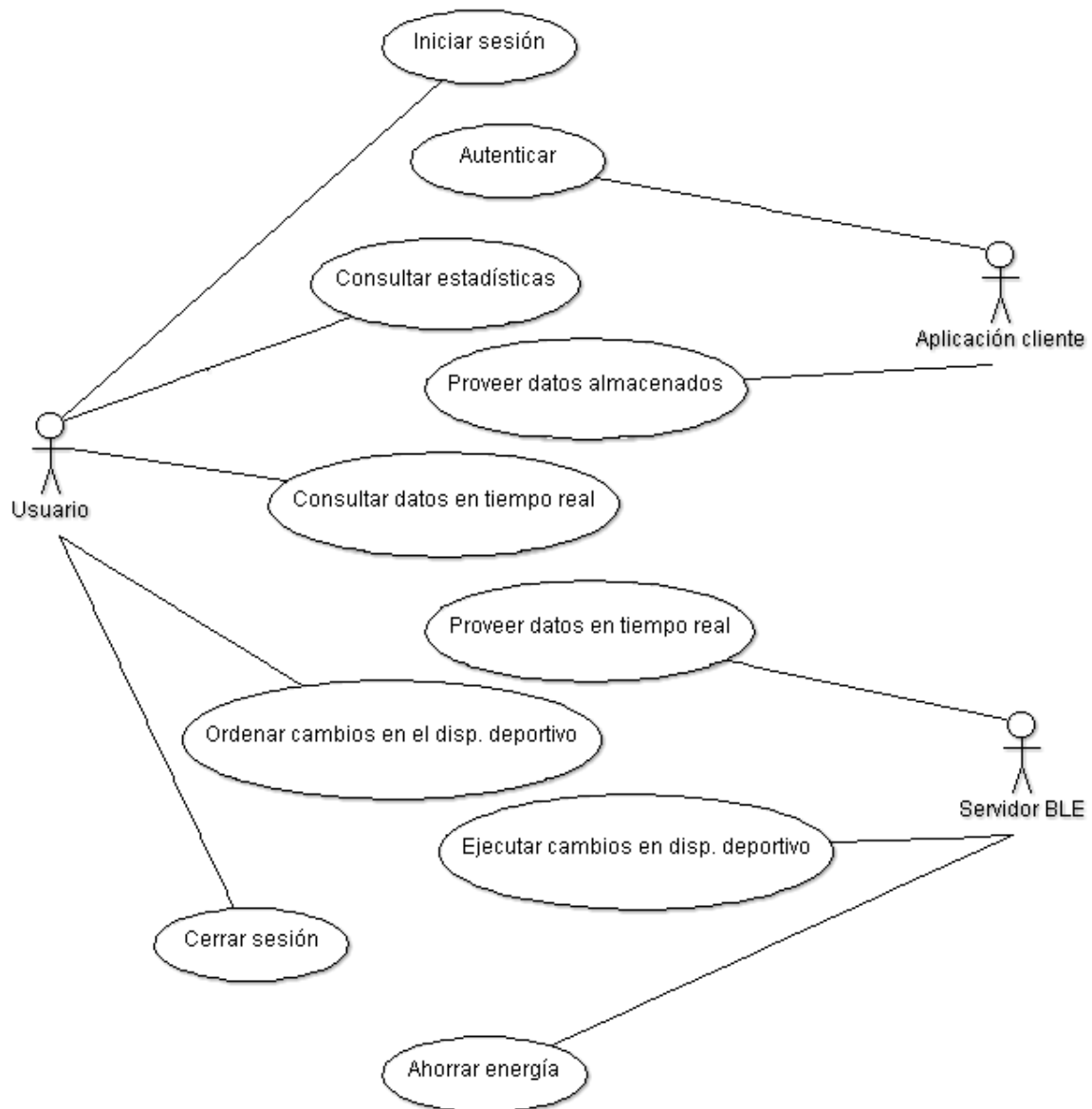
Entre otros, cabe destacar el sistema bluetooth LE puesto que cumple los criterios de simplicidad, al no requerir infraestructura previa. Además, se han tomado medidas específicas para minimizar su consumo. También es ampliamente compatible con la mayoría de los dispositivos móviles desplegados.

De la misma manera se incorporan principios de funcionamiento de grandes redes de comunicación como internet. Por consiguiente, muchos de los problemas de comunicación ya se han estudiado en ocasiones anteriores. Y conceptos derivados de estos estudios pueden ser aplicados en este campo.

El servidor tiene varias características que lo diferencian del cliente. Es por ello por lo que se utiliza el modelo de cliente-servidor. La primera de ellas y más relevante es que el servidor opera con energía teóricamente ilimitada, ya que está conectado a la red eléctrica.

En este paradigma el servidor puede esperar la conexión de un cliente indefinidamente, listo para ofrecer sus servicios.

Por otra parte, el cliente, normalmente un teléfono móvil o PC portátil, cuenta con energía limitada en la batería. Por lo que es necesario tenerlo en cuenta en el diseño.



*Ilustración 93 - Diagrama de casos de uso de la modificación propuesta.*

En el diagrama de casos de uso se observa el papel de cada uno de los actores, identificados por sus respectivos nombres, que intervienen en el funcionamiento. Además, se indican cuales son las acciones que llevan a cabo cada uno.



Por ejemplo, es el usuario el que inicia sesión, proveyendo los datos de identificador y contraseña adecuados para su autenticación. Sin embargo, es el cliente Android el que realiza el proceso de verificación de estos datos, y permite o deniega el acceso al sistema en función de esta verificación.

De nuevo mientras que es el usuario el que consulta los datos estadísticos de otras sesiones, es el cliente quien provee dichos datos, que tiene almacenados. No obstante, en el caso de los datos en tiempo real es el servidor el que los provee para su consulta por parte del usuario.

En definitiva, cada uno de los actores juega un papel distinto a los demás, en función de su capacidad técnica, aunque en conjunto forman el caso de uso.

### *3.3.2. Servidor ESP32 BLE*

#### *3.3.2.1. Análisis funcional*

En un modelo de comunicación cliente-servidor, el servidor se encarga de esperar la conexión de un cliente. Por lo tanto, es el cliente el que inicia la conexión y da los parámetros de misma.

Por el contrario, el servidor provee los llamados servicios, estos son los distintos entes que el cliente puede solicitar una vez establecida la comunicación. Esta comunicación, siguiendo los estándares de Bluetooth Low Energy es adecuada para el caso de uso en cuestión.

El Modelo OSI, o modelo de interconexión de sistemas abiertos, propuesto en la década de los 80 por la Organización de estandarización internacional y la comisión electrotécnica internacional (ISO/IEC 7498-1), es un modelo de referencia para protocolos de red.

Su objetivo es interconectar sistemas de procedencia distinta para que puedan intercambiar información sin impedimentos debido a los protocolos con los que operan según el fabricante (Kurose, Ross, & Paul, 2013).

El modelo OSI define 7 capas o niveles, que describen la comunicación entre varios "Equipos Terminales de Datos" (ETD). Desde el más alto al más bajo son:

Capas	Niveles	Categorías
<b>Capa 7</b>	nivel de aplicación	Aplicación
<b>Capa 6</b>	nivel de presentación	
<b>Capa 5</b>	nivel de sesión	
<b>Capa 4</b>	nivel de transporte	
<b>Capa 3</b>	nivel de red	Transporte de datos
<b>Capa 2</b>	nivel de enlace de datos	
<b>Capa 1</b>	nivel físico	

Este modelo por capas permite distinguir la aplicación del nivel físico y de red, por ejemplo. Facilitando el estudio de las partes, y sirviendo de marco de referencia para entender la comunicación que se produce entre el servidor y el cliente.

En el nivel de aplicación se encuentra la aplicación cliente Android, pero también la aplicación que nos ocupa en este capítulo, que es la que ejecuta el servidor.

Globalmente el servidor se compone de una aplicación, que se ejecuta en un hardware que se detalla en el capítulo sobre el módulo electrónico. Esta aplicación tiene una serie de funciones que se detallan a continuación en la arquitectura del sistema.

### 3.3.2.2. *Arquitectura del sistema*

La aplicación que debe ejecutarse en el servidor tiene características distintas a las que tiene por ejemplo la aplicación cliente Android. Esto se debe a la diferencia en la naturaleza de las acciones que tiene que realizar esta aplicación que lo hacen diferente.

En particular la aplicación cliente Android debe ser capaz de interactuar con el usuario, mientras que el servidor jamás deberá hacerlo directamente. Por ello no es necesario, por ejemplo, que cuente con una interfaz de usuario.

Las actividades que corresponden al servidor se especifican en el siguiente diagrama de actividades, en el que se detallan las funciones que debe cumplir el servidor. Asimismo, se especifican las condiciones en las que debe realizar cada actividad.

También está implícito el orden de realización de dichas actividades.

Un diagrama de actividad sigue la especificación del lenguaje UML que son las siglas en inglés de lenguaje de modelado unificado. Y que sirve para como su nombre indica modelar sistemas, utilizando un estilo de representación de la información unificado.

De esta manera la información y los conceptos pueden ser entendidos por diferentes personas, sin ambigüedad y de forma eficiente (Larman Craig, 2005). A continuación, se muestra el diagrama UML correspondiente a la aplicación servidor, de la modificación propuesta para la cinta ergométrica.

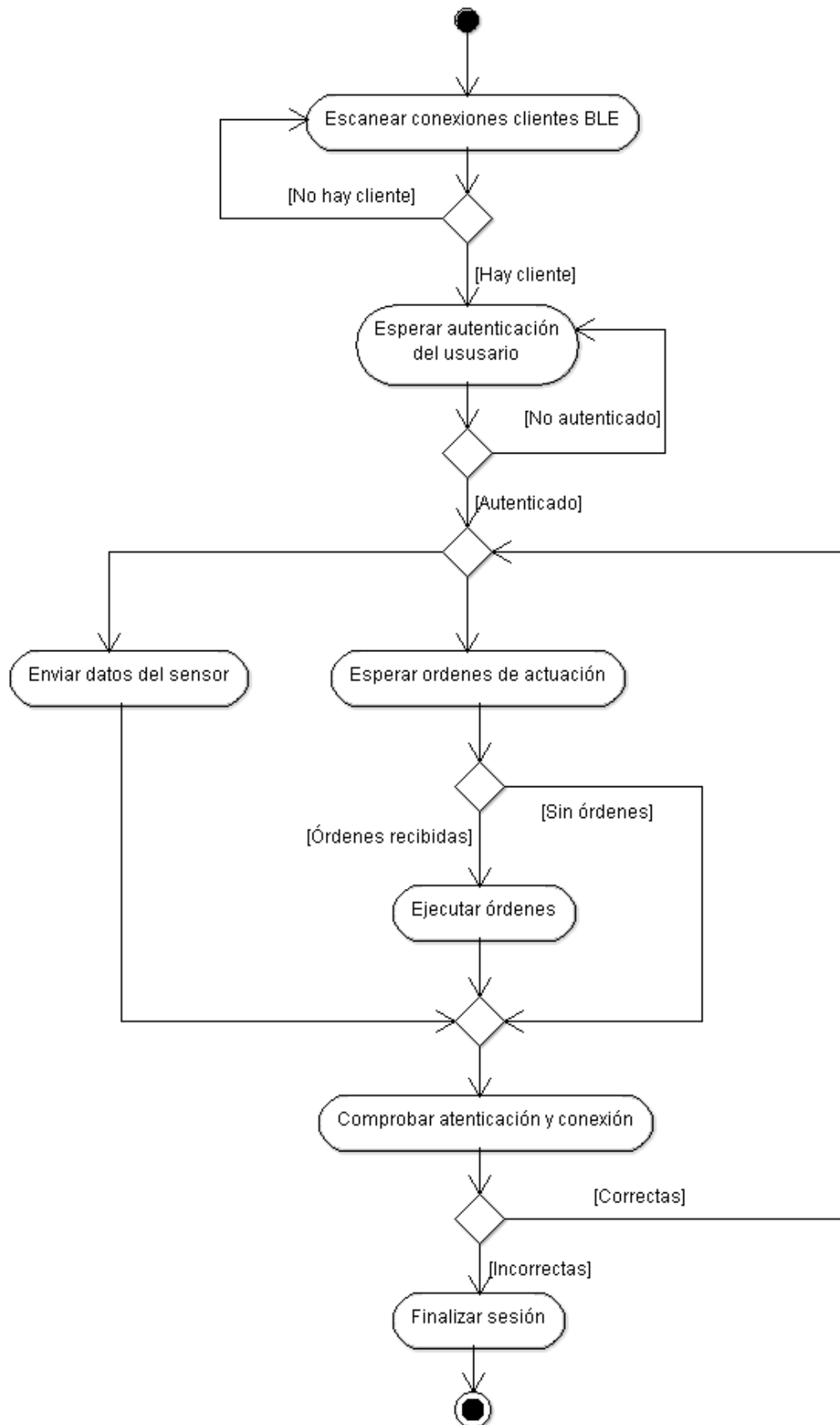


Ilustración 94 - Diagrama de actividad correspondiente al servidor BLE.

En el diagrama se especifica que es el servidor el que espera indefinidamente la conexión de un cliente. A continuación, se verifica que efectivamente el cliente está autenticado.

Una vez que el usuario se ha identificado la aplicación cliente da el visto bueno para el inicio de la ejecución de la aplicación servidor. Que tiene dos procesos principales.

El primero de ellos se encarga de enviar los datos generados por el sistema deportivo. Esto es la información que recaba del sensor y que procesa como datos de velocidad, tiempo transcurrido y distancia recorrida entre otros.

Por otra parte, el servidor se encuentra a la espera de órdenes por parte del cliente. En el caso de que este envíe una se encargara de ejecutarla por los medios que se han provisto en el diseño electrónico para tal fin.

Después de la ejecución de estos procesos, se procede a verificar que el cliente sigue conectado y el usuario autenticado. En caso afirmativo la ejecución se repite. Por el contrario, si la condición falla se finaliza la sesión. Punto en el que termina la actividad del servidor.

### 3.3.3. Cliente Android

#### 3.3.3.1. Análisis funcional

El cliente Android consta a nivel de aplicación de unas capacidades distintas al servidor. La diferencia más notable es la necesidad de una interfaz de usuario. Esta sirve para mostrar y solicitar información del usuario, esto es, para comunicarse con este.

Además, es el cliente el que se encarga de la autenticación del usuario, de tal manera que los datos no se comunican al servidor. Ayudando a preservar la privacidad de este.

El cliente también accede a una base de datos de estadísticas de sesiones anteriores. De esta manera el usuario puede consultar la información de otras sesiones. Lo que permite la comparación de resultados y el registro de los progresos realizados.

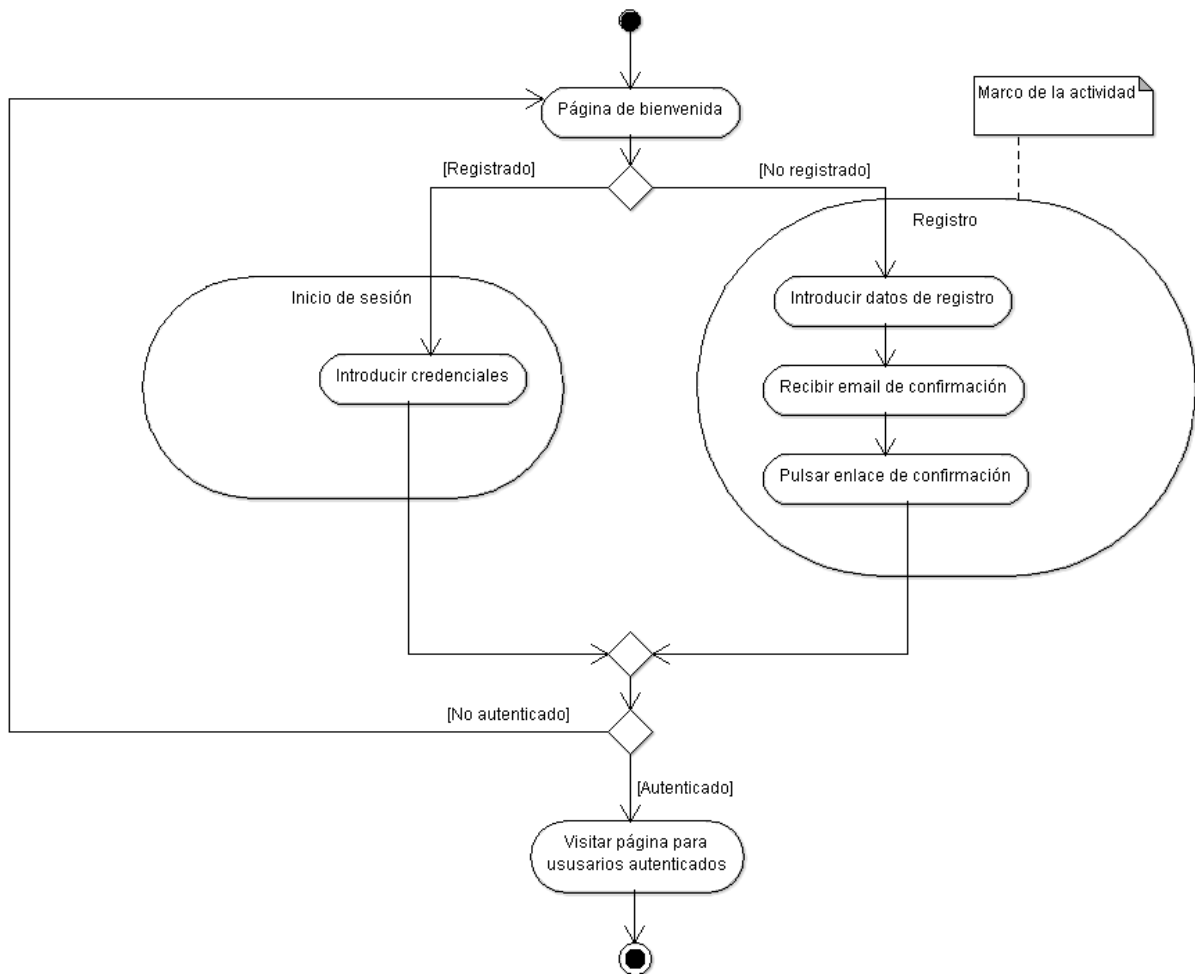
La aplicación cliente funciona sobre el sistema operativo Android, que la permite abstraerse del hardware. Por lo tanto, el cliente puede funcionar en diversos terminales que cuenten con las especificaciones requeridas.

El hecho de que el cliente funcione sobre un dispositivo móvil facilita al usuario acceso a los datos, haciendo uso de medios de los que ya dispone. Con una infraestructura sencilla que reduce el coste de implementación. Y por tanto facilita la implementación en el mercado.

Como el cliente tiene dos funciones bien diferenciadas, la de autenticar al usuario y la de proveer los datos y controles, se realizan dos diagramas que representan actividades diferentes.

Ambas actividades están relacionadas en la misma aplicación, aunque no se ejecutan a la vez. En su lugar la autenticación es condición necesaria para la actividad informativa y de control.

### 3.3.3.2. Arquitectura del sistema



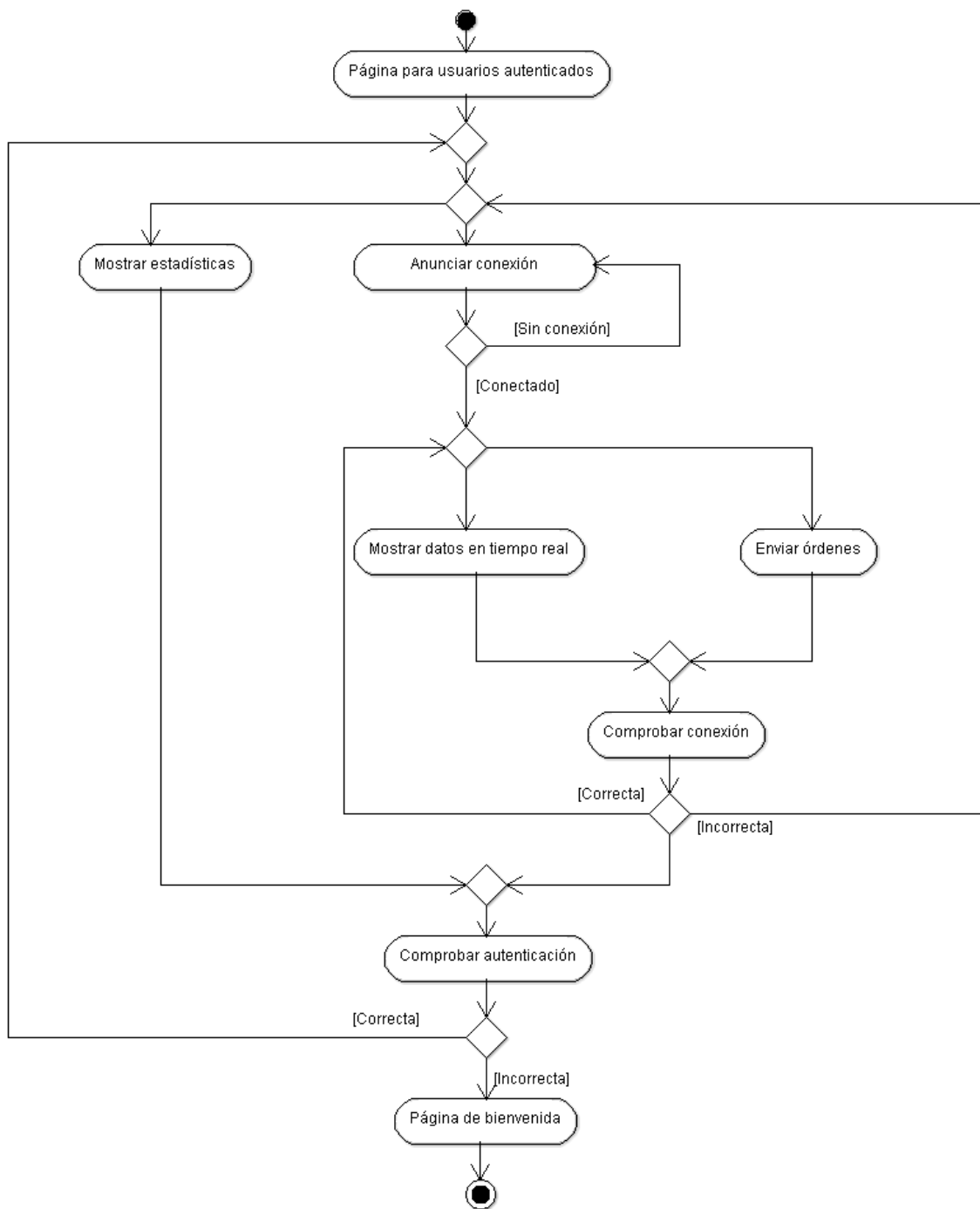
*Ilustración 95 - Diagrama de actividad de autenticación del usuario por parte del cliente Android.*

La actividad de autenticación comienza en la página de bienvenida, que discrimina a los usuarios anteriores de los nuevos. A estos últimos les ofrece un formulario de registro, para que puedan autenticarse en ocasiones posteriores.

El proceso de registro consiste en obtener los datos del usuario y confirmar su autenticidad mediante un email enviado. En el que el usuario debe pulsar un enlace de confirmación.

En cambio, a los usuarios reincidentes se les redirige directamente a la página de inicio de sesión en la que deben introducir las credenciales. En caso de que estas sean correctas se envía al usuario a la página para usuarios autenticados.





*Ilustración 96 - Diagrama de actividad de la aplicación cliente Android propuesta.*

La segunda parte de la aplicación cliente es la que desarrolla la actividad principal propiamente dicha. Esta actividad comienza en el punto en el que termina al anterior. En la página para usuarios autenticados.

En este punto se muestran las estadísticas de otras sesiones y se anuncia la nueva conexión. Como el servidor está esperando conexiones, si las demás capas lo permiten se producirá la conexión.

En este momento el cliente está listo para mostrar los datos en tiempo real recibidos del servidor BLE. También se pueden enviar órdenes si el usuario así lo decide. Después se comprueba la conexión, si esta es correcta se repite esta parte del proceso.

En caso de que la comprobación no sea satisfactoria se retorna a la página de bienvenida y se da por concluida esta actividad.

En definitiva el cliente se encarga de interactuar con el usuario, tanto informándolo como recogiendo su información y transmitiendo sus órdenes al servidor, que se encargará entonces de ejecutarlas en función de su autoridad sobre el sistema de cinta ergométrica.

### 3.3.4. Diseño de módulo electrónico

#### 3.3.4.1. Análisis funcional

Mediante un análisis pormenorizado de las señales que entran y salen de la placa, se conocen y caracterizan las señales que entran y salen de las placas electrónicas. Por consiguiente, es posible conocer en que grado es necesario modificar o alterar la máquina por métodos y técnicas electrónicas para dar nuevos servicios por canales innovadores.

Dicho de otra manera, saber si es posible de forma mínimamente invasiva alterar el diseño de la máquina para añadirle capacidades más acordes con la técnica actual, e integrarla en el ecosistema digital que los usuarios disfrutan en otras áreas de su vida cotidiana.

Afortunadamente el robusto diseño de la cinta ergométrica utiliza mecanismos sencillos para la transmisión de información. Como se ha estudiado, las señales tienen una tensión y si esta es llevada a GND la placa principal lo entiende como una orden. Esto permite que un dispositivo adicional que intervenga la línea pueda llevarla a GND también. Actuando según el operador lógico XOR, O-exclusivo.

Es decir, si cualquiera de las dos fuentes emite la orden, el receptor la cumple. Por tanto, basta con darle esta capacidad al módulo adaptador para que sea capaz de alterar los parámetros de funcionamiento de la máquina sobre la marcha.

Por otra parte, como la placa auxiliar y la principal no son topológicamente compatibles en el uso de cada una de las líneas. El punto perfecto para la introducción de un módulo adaptador es el que es capaz de trasladar de forma transparente las señales de ambos y además incorporar las suyas en caso de ser necesario.

De esta manera se obtiene una elegante solución a la modificación de la cinta ergométrica.

Dicho de otro modo, se tiene la capacidad de dar órdenes al módulo de potencia, manteniendo el método original.



Además, se consigue una modificación reversible y no que no obstruye a los usuarios que prefieran el método original de control y visualización.

Incluso podrían utilizarse ambos métodos de visualización y control, alternativamente.

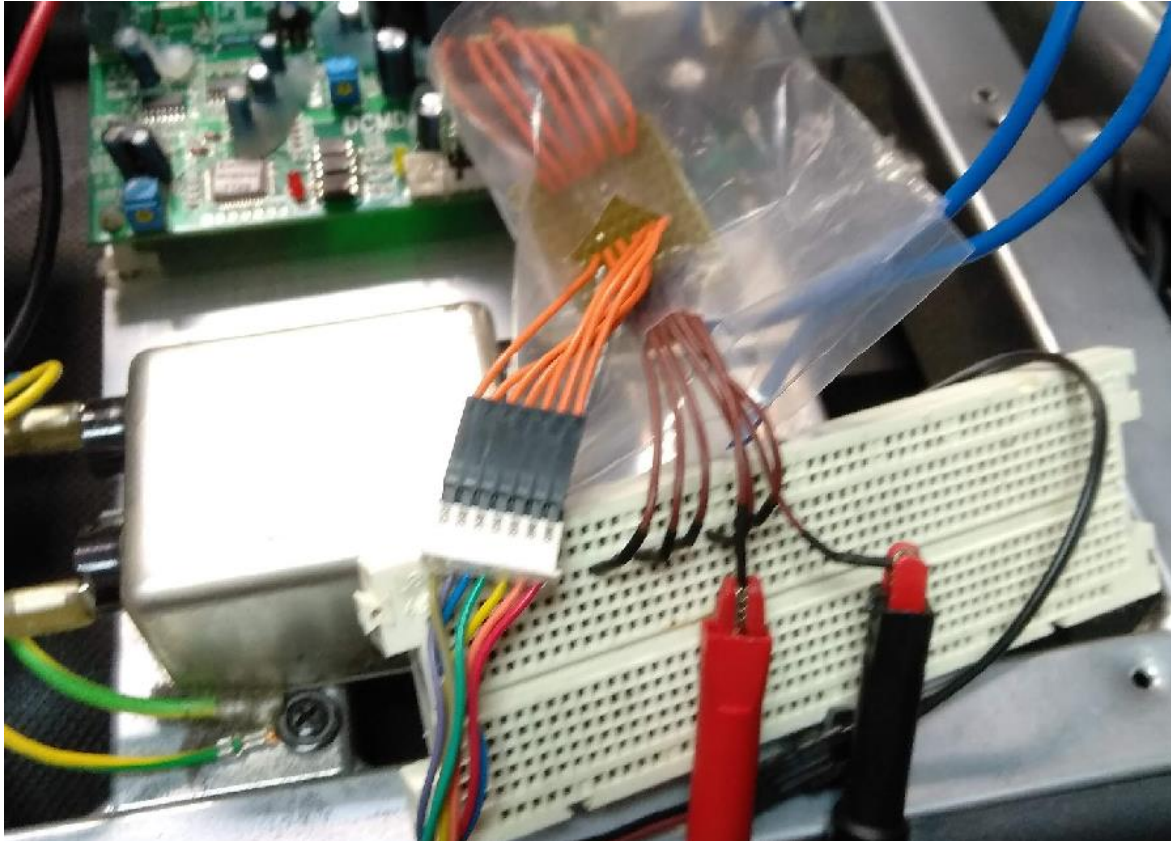
### 3.3.4.2. *Arquitectura del sistema*

El módulo electrónico de interfaz (J1-N3TE) se emplaza entre la placa auxiliar original y el módulo electrónico de reemplazo. Ambos cuentan con un conector JST de 7 pines, aunque también es cierto que ambas placas envían señales diferentes por cada uno de los pines.

Como resultado el módulo electrónico debe cumplir las especificaciones de ambos, de tal manera que existen dos conectores. El primero dedicado a la placa auxiliar y el otro conectado a la placa principal.

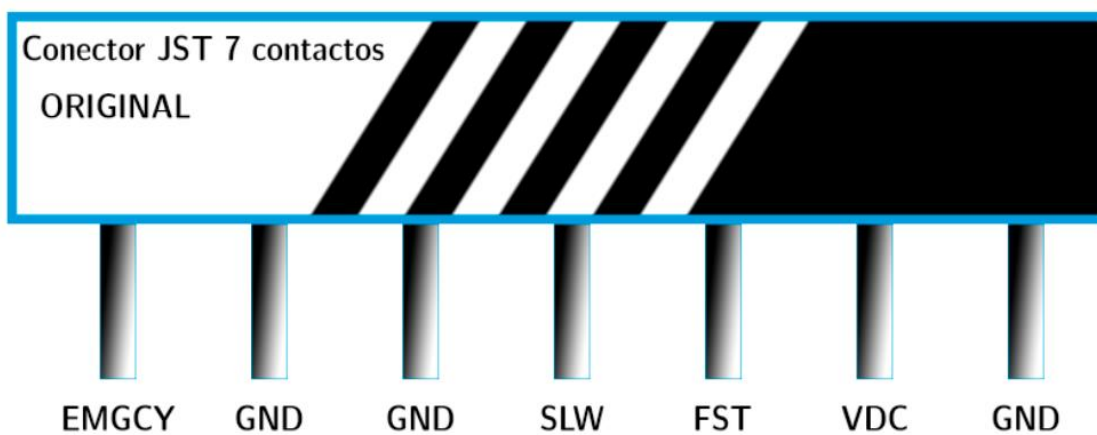
Debido a que la documentación de la referencia comercial de las placas no es de dominio público, se obtiene el significado de los pines y su función mediante método experimental.

Midiendo y observando su comportamiento en los diferentes estados de la máquina. Mediante el puente fabricado durante las realizaciones anteriores. Este permite medir las señales sin afectar el funcionamiento de la máquina.



*Ilustración 97 - Intervención de las señales para conocer su naturaleza.*

Conociendo la naturaleza de las señales, se deduce su función. Esto se realiza mediante la pulsación de los controles y otras acciones, para después observar los cambios en las señales. Cabe destacar que no están correctamente etiquetadas en las PCB. Ya sea por ausencia de las etiquetas o porque no corresponden a su función.



*Ilustración 98 - Señales que circulan por los pines de la placa original.*

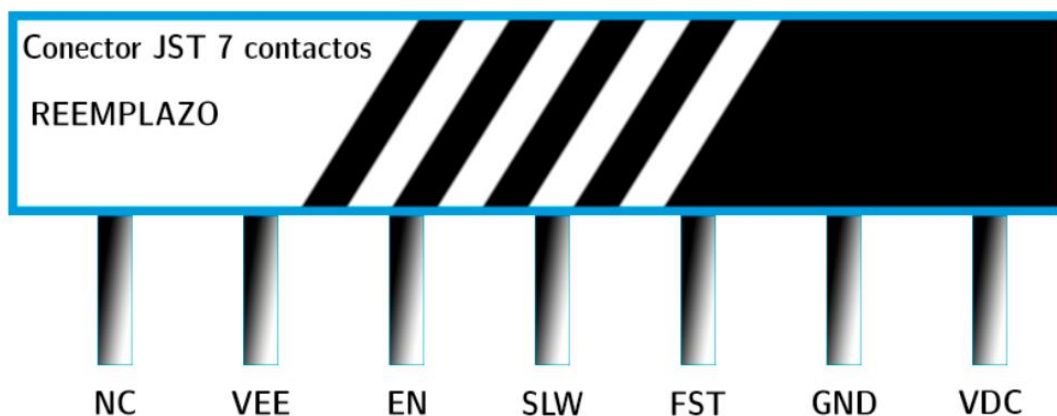
En las placas originales, existe un pin de emergencia cuyo valor está a la tensión de VDC cuando todo está bien. En consecuencia, la máquina puede arrancar.

En cambio, si se encontrara a 0V ya sea porque así lo indica el pulsador de emergencia, porque los cables se han roto o porque mediante una intervención lógica XOR de la señal la lleva a GND; la máquina se detiene de inmediato si está funcionando. Además, no permite el rearme de la rama de potencia en caso de estar parada.

Los pines que se han denominado SLW y FST funcionan siguiendo los mismos principios. Cuando están a tensión VDC no hacen nada. Cuando son llevados a GND provocan la modificación de la consigna de frecuencia angular del motor. Disminuyéndola o incrementándola respectivamente.

La tensión VDC es de aproximadamente 15V, proviene de una de las fuentes de alimentación de menor potencia situada en la placa principal, y alimenta la placa auxiliar.

La placa de reemplazo, en cambio, presenta algunos cambios en las señales, aunque el principio de funcionamiento permanece invariable.

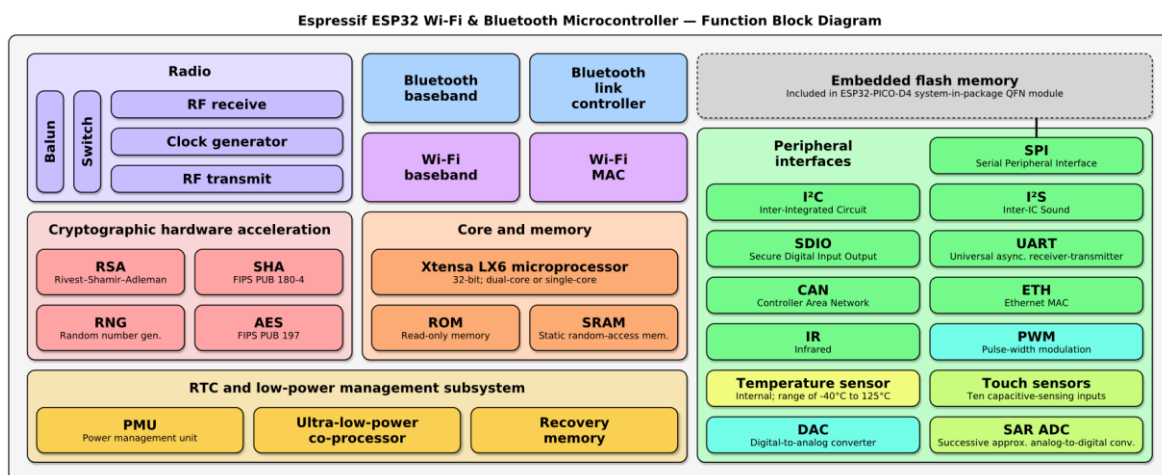


*Ilustración 99 - Pines en la placa de reemplazo y sus funciones.*

Como se puede observar, en este caso uno de los pines no es utilizado. Mientras que el Pin EMGCY se sustituye por un pin EN. Este funciona de manera similar. Tiene una tensión VDC, y en caso de ser llevado a GND provoca la desactivación de la rama de potencia. También impide su rearme.

Cabe destacar también el cambio de posición en los pines GND y VDC. Este debe ser tenido en cuenta en el diseño del módulo electrónico. Así como la exposición en el conector de una nueva tensión VEE.

El núcleo de la placa es un microcontrolador *Espressif ESP32* que cuenta con módulos de comunicación Wi-Fi y Bluetooth incorporados, así como las diferentes bandas base y controles de acceso al medio y la radio necesaria para establecer estas comunicaciones inalámbricas. Todo ello en una huella física muy pequeña y con un consumo energético reducido.



*Ilustración 100 - Diagrama de bloques funcionales de la arquitectura del ESP32.*

En la ilustración se aprecian los diferentes bloques funcionales de los que dispone la arquitectura ESP32, algunos de ellos lo hacen idóneo para el módulo electrónico propuesto. Entre ellos las capacidades de comunicación inalámbrica, así como sus entradas y salidas propias de un microcontrolador.

Cabe destacar que cuenta con capacidad de procesamiento suficiente para tareas más complejas que las que se van a realizar en este desarrollo.

A continuación, se hará un análisis de la arquitectura propuesta para la integración de este microcontrolador en el módulo adaptador de la cinta ergométrica.



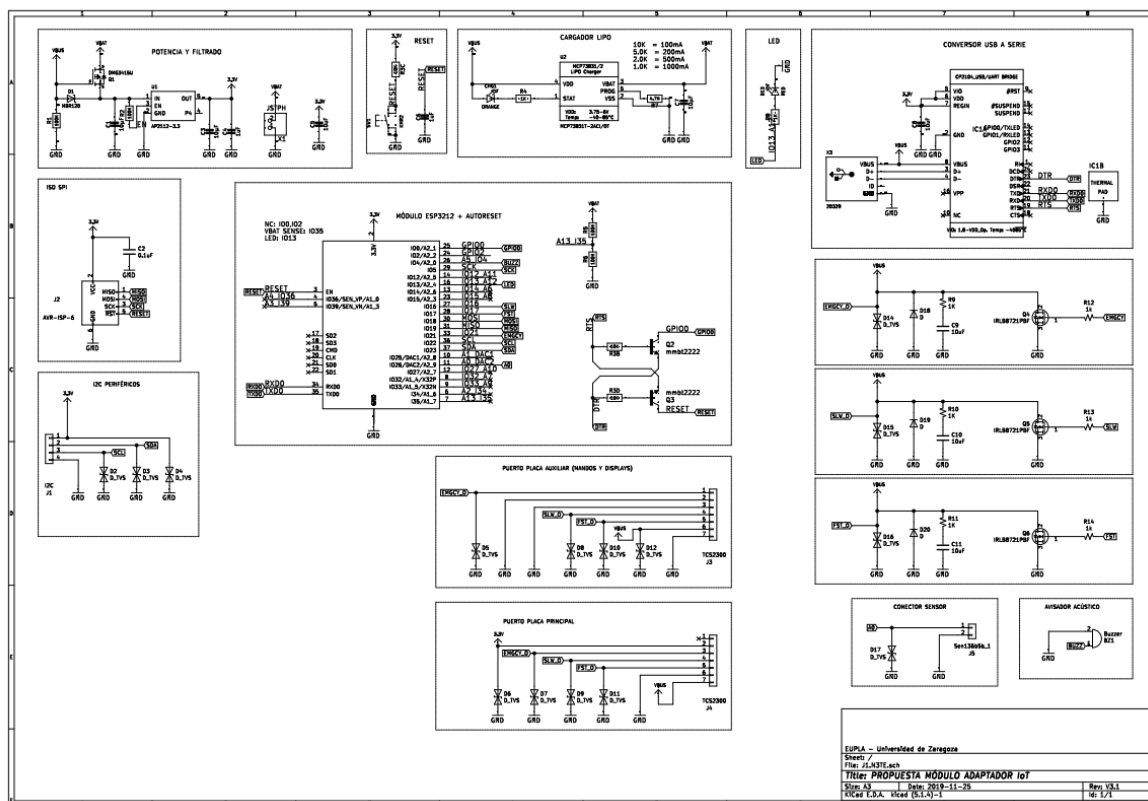


Ilustración 101 - Vista general del esquema electrónico del módulo electrónico de adaptación propuesto.

Las unidades fundamentales del módulo adaptador están relacionadas con el microcontrolador y su actividad. Por lo tanto, incluyen desde la alimentación y las entradas y salidas a los diferentes puntos. Pasando por la capacidad de conexión con un PC para su depuración y actualización.

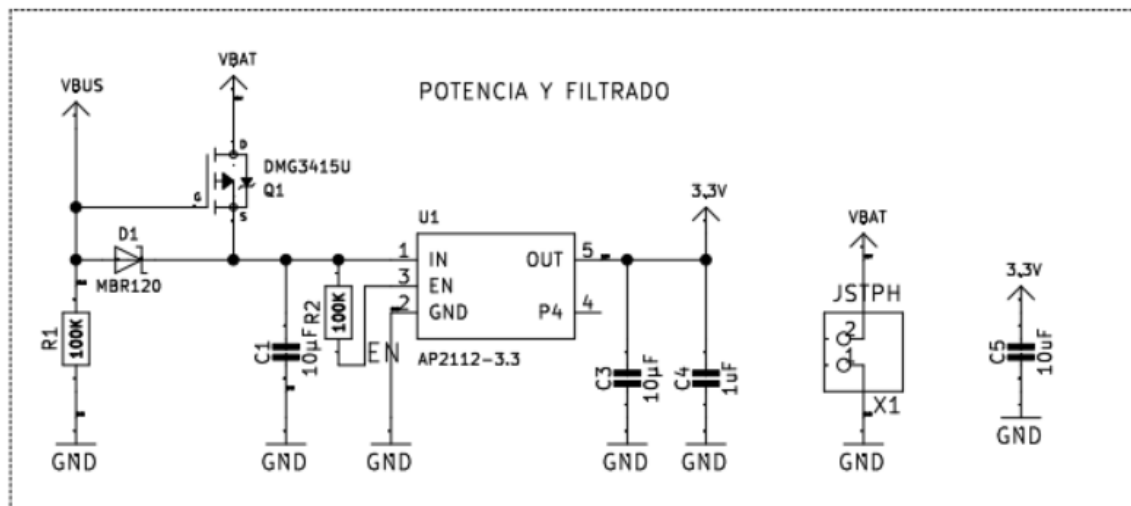


Ilustración 102 - Circuito propuesto de potencia y filtrado para el módulo adaptador de la cinta ergométrica.

En el apartado de potencia y filtro, encontramos una fuente conmutada. Esta ayuda a reducir el consumo energético, ya que su eficiencia energética es superior al 80%. También se ha optado por la incorporación de una pequeña batería de litio, para que en caso de un corte repentino de el suministro eléctrico se puedan terminar de realizar las actividades de comunicación y cierre de sesión correctamente.

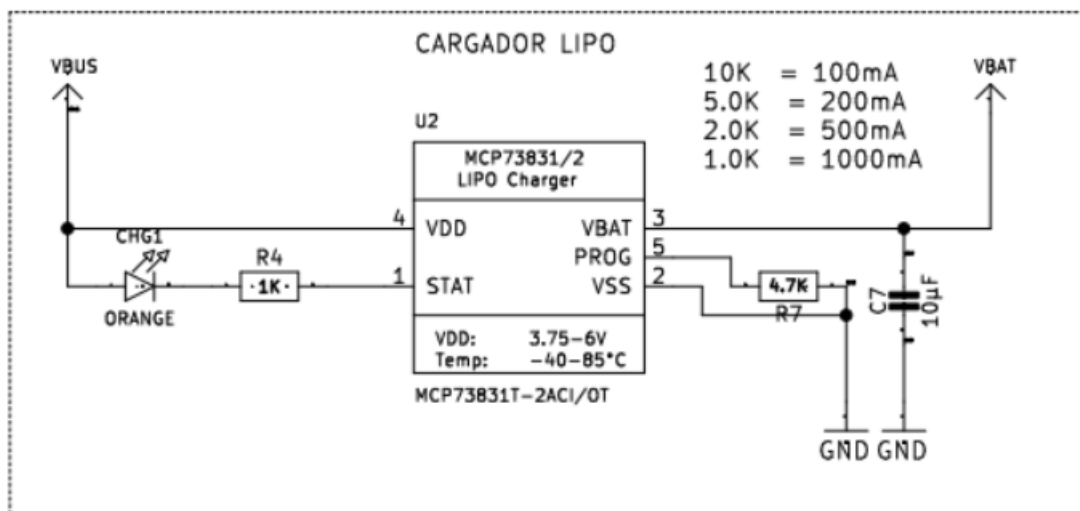


Ilustración 103 - Cargador de la pequeña batería embarcada.

Además, la alimentación por batería reduce el estrés sobre los componentes de potencia originales instalados en la máquina. Esto es porque su carga se distribuye en el tiempo resultando en pequeños consumos de corriente sostenidos en el tiempo.

Mientras que los componentes son capaces de consumir cantidades más grandes de corriente durante periodos más cortos de tiempo. Lo que encaja con el caso de uso de la cinta ergométrica.

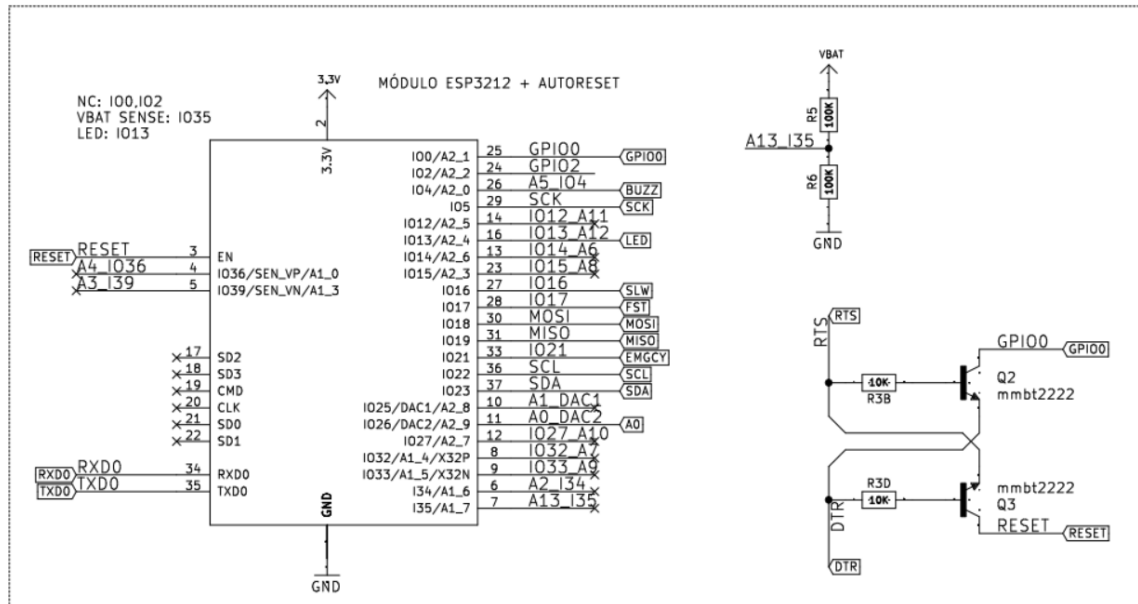
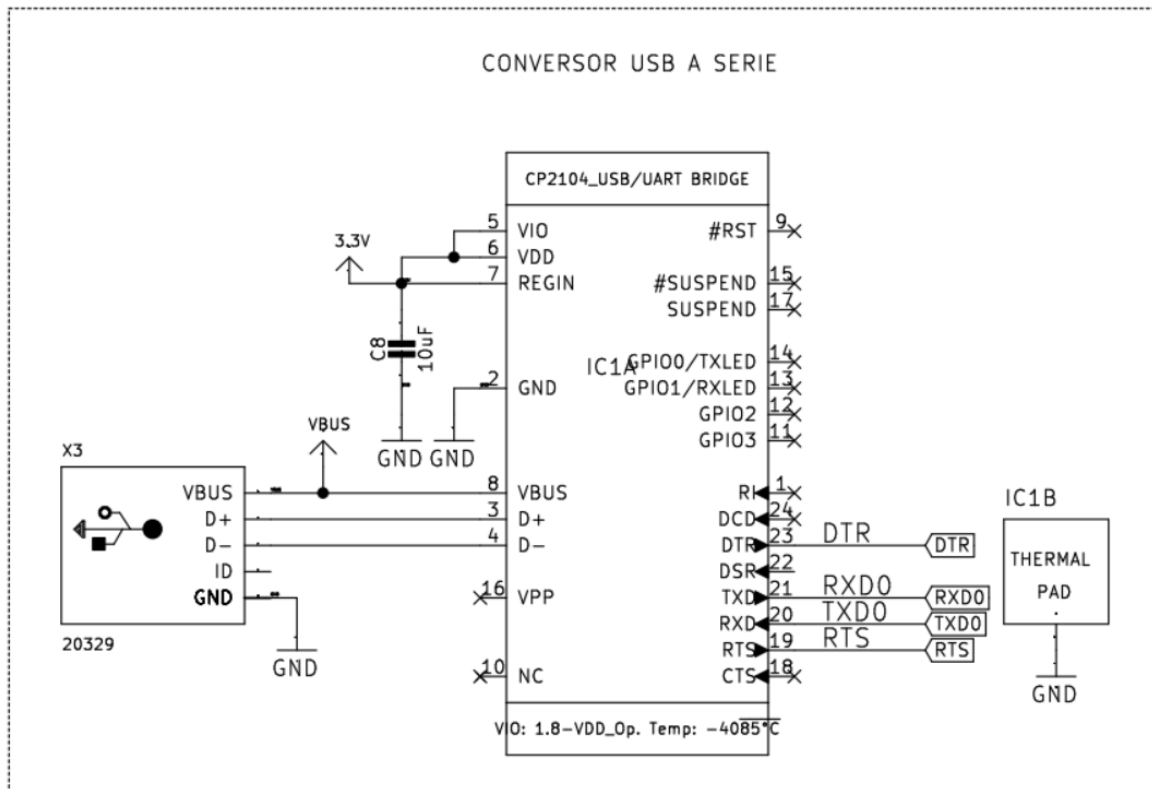


Ilustración 104 - El núcleo del módulo adaptador.

El núcleo está compuesto de un microcontrolador. Este ejecuta la aplicación servidor y se comunica con los diferentes periféricos mediante sus contactos. Algunos de ellos proveen señales individuales, mientras que otros actúan de forma organizada para dar forma a los distintos puertos.

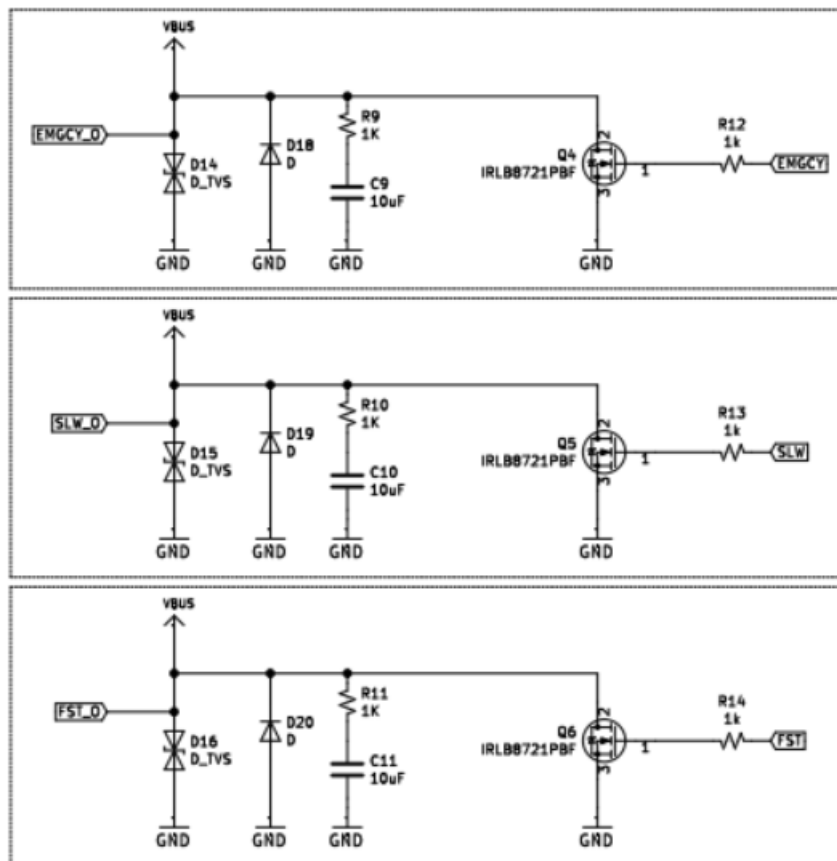
También se incluye un mecanismo de auto reinicio, para permitir la programación mediante otros sistemas informáticos, dándoles la capacidad de no requerir intervención humana en ciertos apartados del proceso.

También se encarga de la comunicación Bluetooth LE. Mediante sus bloques funcionales incorporados correspondientes.



*Ilustración 105 - La comunicación ente el PC y el núcleo de la placa se lleva a cabo mediante un conversor entre USB a serie.*

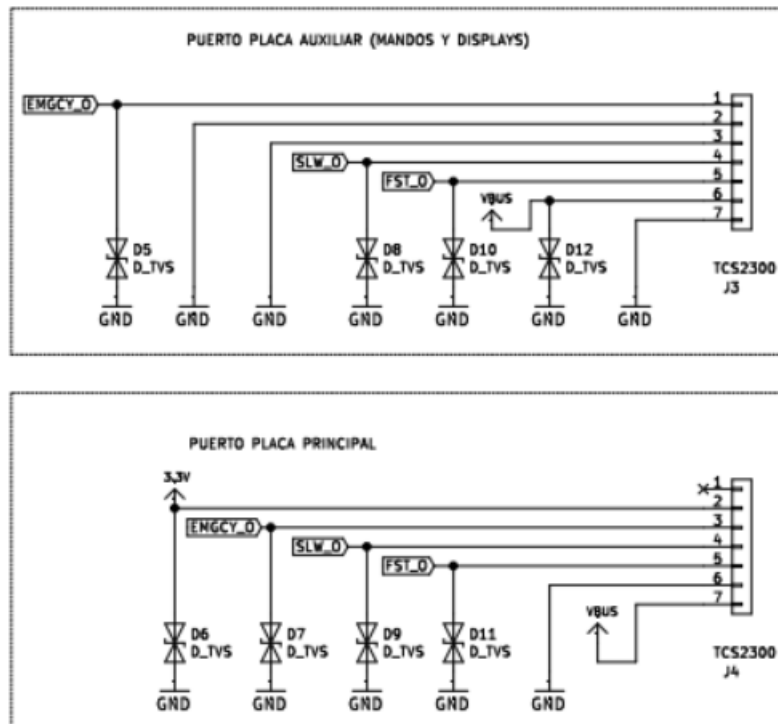
El conversor USB a serie provee comunicación entre el núcleo del módulo adaptador y su contraparte informática, para tareas de depuración y actualización. Esto mejora el mantenimiento del sistema. Haciéndolo más duradero y adaptable a diferentes condiciones.



*Ilustración 106 - Adaptadores de señal que convierten la señal del microcontrolador a la salida que va a la placa principal.*

La adaptación de la señal del microcontrolador a la salida se lleva a cabo mediante una serie de interruptores estáticos que permiten el manejo de tensiones y corrientes mayores a las permitidas por los contactos del microcontrolador.

Además, incorporan una serie de filtros que permiten su funcionamiento a largo plazo, reduciendo el estrés al que están sometidos los componentes en los regímenes transitorios. Así como en condiciones anómalas.



*Ilustración 107 - Conectores de las distintas placas a las que se conecta el módulo adaptador.*

Debido a las diferencias en la topología de los conectores, es necesario que el ruteo de ambos sea distinto. Proveyendo señales iguales, aunque en distintos pines, y también añadiendo algunas en el caso de la placa principal de reemplazo.

De estos conectores, concretamente del que comunica a la placa principal, proviene la alimentación del módulo adaptador.

También se dispone un conector para el sensor de frecuencia angular. Esto se debe a que por defecto la señal producida por el sensor está canalizada directamente a la placa secundaria. Sin embargo, el cable está situado junto al conector JST de 7 pines, por lo que es posible intervenirla de la misma forma que dicho conector.

Existen conectores I2C e ISO-SPI que proporcionan comunicación con otros circuitos integrados, en caso de ser requerido.

Para finalizar se dispone de un mecanismo de reinicio manual con un pulsador, un indicador led de funcionamiento, así como un avisador acústico entre otros. Estos dispositivos completan la funcionalidad del módulo de adaptación propuesto.

## 4. CONCLUSIONES

El desarrollo del Trabajo de Fin de Grado, así como el pertinente estudio y marco teórico previo, provee una oportunidad de análisis de un problema. Este análisis conduce a una serie de conclusiones, que son ni más ni menos que el producto de este ejercicio.

La ejecución de una tarea de este tipo y magnitud requiere de una planificación minuciosa, que debe incluir desde lo más básico, pasando por los métodos que se emplearan y la dedicación requerida, hasta la misma logística que acarrea la cuestión a tratar.

Se trata de un ejercicio enriquecedor, que permite expandir las fronteras de la educación relacionando los conocimientos adquiridos en las aulas con el mundo, este último se comporta a placer y no siempre facilita la labor en esfuerzos de este tipo.

En un tono más técnico, los desarrollos generados en el marco del trabajo generan la necesidad y con suerte la curiosidad para explorar campos de conocimiento ya vistos durante los años de estudio.

Profundizando un poco más en algunos de ellos e incluso relacionándolos con otros campos que el autor desconoce en un principio, y de los que poco a poco adquiere entendimiento de forma más o menos autónoma con el apoyo de las diferentes personas involucradas, como el director, tutores y profesores dispuestos a echar una mano en los momentos más oportunos, en su afán por transmitir lo que saben y conocen.

En el desarrollo de este trabajo particular se destilan una serie de ideas generalizables, que podrían ser lo que el lector se lleve consigo tras recorrer estas páginas.

En primer lugar, cabe destacar la incertidumbre que rodea a la ejecución de un proceso con vistas a la consecución de unos objetivos. En un inicio hay tantas variables que es difícil decidir por dónde empezar, por eso es importante la aplicación de un buen

método que disipe las dudas y establezca una forma ordenada y metódica de resolver un problema.

En el caso de la cinta ergométrica, la asociación ADISPAZ se aproxima con un problema del que en un principio no se sabe si tiene una solución sencilla, o posible en su caso.

Sin embargo, en lugar de rechazar de pleno el problema, una persona con formación científica y técnica lo que puede hacer es observar y estudiar el problema metódicamente para en su caso obtener el mejor proceso de mejora que aproxime el resultado a los objetivos.

Para la resolución de estos desarrollos se opta por un método versátil y flexible, el método en V, que permite la estructuración de procesos de desarrollo, y su carácter iterativo y de estudio, ensayo y error.

Ha resultado de gran utilidad, especialmente cuando se llega a resultados satisfactorios, en los que una posibilidad natural es dar por concluido el proyecto. En su lugar el método en V propone un modelo de mejora continuada.

Cuando se inicia la restauración la incertidumbre es muy elevada mientras que la información acerca del problema es muy escasa. Sin embargo, el método esclarece una serie de pasos a seguir de conceptualización de las operaciones, requerimientos y arquitectura, diseño de detalle, fase de implementación y las importantes fases de integración, pruebas y verificación, validación sistemática e incluso operación y mantenimiento.

Todo ello sin cerrar la puerta mediante fases de validación y verificación a producir mejoras en las soluciones propuestas en iteraciones siguientes.

Esto sienta una hoja de ruta para llegar a un punto en el que la incertidumbre está reducida y el conocimiento del problema es mayor, con una o varias propuestas de soluciones ya en distintas fases de madurez.



Así es como se localiza la avería de la máquina y se propone una solución. La máquina se encuentra entonces en estado operativo, aunque validando el problema desde un punto de vista holístico la causa que ha provocado la avería no se ha tratado en forma alguna.

Por tanto, se ha solucionado el fenómeno de avería, pero no los posibles noúmenos que lo acrecientan y aceleran. Es en este punto donde nace la segunda fase del desarrollo, en la que se mitiga la acción del factor principal de degradación de la placa principal de la cinta ergométrica. En este caso se trata de un fenómeno térmico.

Consiste concretamente en que cuando un usuario corre sobre la cinta es más favorable para los componentes electrónicos de potencia, debido a la escasa refrigeración que reciben en regímenes lentos, como los que se producen al caminar.

Esta idea es sencilla, pero contra intuitiva. De nuevo para desarrollarla el mayor aliado es el método riguroso. Debido a que es de las mejores formas de evitar el razonamiento por analogía, que es tan valioso en la vida cotidiana, pero que nos mantiene alejados de las nuevas ideas que son distintas a otras o que parecen contradecir algunos principios básicos a primera vista.

En realidad, probablemente no contradicen a los principios fundamentales, en su lugar por lo general la combinación fortuita de efectos poco evidentes, produce a veces efectos inesperados. De hecho, estos son sujetos válidos de estudio siempre y cuando se traten con la adecuada metodología para descomponerlos adecuadamente en sus principios fundamentales, y finalmente entenderlos de manera adecuada.

En este trabajo, se lleva a cabo una tercera fase de desarrollo. Esto es porque si nos ceñimos a la aplicación del método en V aparece una fase tras la verificación de la solución anterior. Es la fase de operación. La opinión puede indicar ahora que la cinta ergométrica cumple su función, y que será más difícil que se produzca la misma avería.

Sin embargo, el carácter iterativo del método en V nos lleva a validar la solución de cinta ergométrica que se ha producido, equiparándola a otras soluciones disponibles.

Este análisis pone de relieve algunas carencias observables. Esto es debido al avance de la técnica, y a que no se manifiestan en el dispositivo que nos ocupa.

Además, continuando este análisis es posible llegar a la realización de que dicho avance permite, por los fenómenos de oferta y demanda, así como los fenómenos económicos de escala, que la actualización de las capacidades del dispositivo sea una tarea asequible.

Por eso se proponen las bases para futuras líneas de trabajo en este sentido. Y aunque por diferentes restricciones como las de naturaleza económica y temporal, no se ha llevado a cabo la implementación de este desarrollo. De Nuevo el Método V permite que la ejecución de un proyecto continúe.

Esto es porque no es tan importante quien o cuando lleva a cabo los procesos, en contraposición a la importancia que se le da la metodología de ejecución de dichos procesos. Incluyendo en este caso, por ejemplo, la generación de documentación necesaria para la transmisión del proyecto entre otros procesos.

Después de este proceso se ha conseguido:

- Aplicar el método en V para estudiar objetivamente un problema del que se tiene un gran nivel de incertidumbre y poca información inicial. Esto es generalizable a otros trabajos.
- Restaurar la máquina a un estado funcional, para que se pueda continuar utilizando para cinesioterapia de la marcha en el centro ocupacional ADISPAZ.
- Acondicionar la cinta ergométrica para el caso de uso de cinesioterapia de la marcha, mitigando las causas de aparición de la misma avería.
- Identificar la capacidad de modificar la cinta ergométrica para adaptarla al ecosistema digital.

Dicho esto, se proponen como líneas futuras de investigación:

- El desarrollo de una placa de adaptación más completa que la que el alcance temporal y económico de este proyecto han permitido.
- El desarrollo de una aplicación servidor con capacidades IP para conectarse a otras redes, incluyendo internet.
- El desarrollo de una aplicación cliente para dispositivos móviles con una funcionalidad más completa y que se ajuste a las necesidades de múltiples usuarios y casos de uso.

Facilitando de esta forma que un trabajo de este tipo incite actividades posteriores similares, y continúe el proceso de estudio científico y desarrollo técnico.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J., & Watteyne, T. (2017). Understanding the Limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 34-40. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600613>
- Bathilde, J. B., Then, Y. L., Chameera, R., Tay, F. S., & Zaidel, D. N. A. (2018). Continuous heart rate monitoring system as an IoT edge device. *2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/SAS.2018.8336777>
- Bonyadi, M. R., & Michalewicz, Z. (2017). Particle Swarm Optimization for Single Objective Continuous Space Problems: A Review. *Evolutionary Computation*, 25(1), 1-54. [https://doi.org/10.1162/EVCO\\_r\\_00180](https://doi.org/10.1162/EVCO_r_00180)
- Chang, T., Watteyne, T., Vilajosana, X., & Gomes, P. H. (2019). Constructive Interference in 802.15.4: A Tutorial. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 21(1), 217-237. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2870643>
- Crow, B. P., Widjaja, I., Kim, J. G., & Sakai, P. T. (1997). IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks. *IEEE Communications Magazine*, 35(9), 116-126. <https://doi.org/10.1109/35.620533>
- Das, A. K., Pathak, P. H., Chuah, C.-N., & Mohapatra, P. (2016). Uncovering Privacy Leakage in BLE Network Traffic of Wearable Fitness Trackers. *Proceedings of the 17th International Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 99–104. <https://doi.org/10.1145/2873587.2873594>
- Dion, B., Consiglio, J., Coiro, M. C., Willhite, A., Intonato, J., & Evancho, B. (2018). *United States Patent N.º US20180126248A1*. Recuperado de <https://patents.google.com/patent/US20180126248A1/en>

- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2005). *Sistemas de control moderno*. Pearson Educación.
- Foley, J. P., CORTESE, T., Feng, Y., Sira, C. B., & Woolley, H. S. (2018). *United States Patent N.º US9861855B2*. Recuperado de <https://patents.google.com/patent/US9861855B2/en>
- García-Villalobos, J., Zamora, I., San Martín, J. I., Asensio, F. J., & Aperribay, V. (2014). Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart charging approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 717-731. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.040>
- Gupta, N. K. (2016). *Inside Bluetooth Low Energy, Second Edition*. Artech House.
- Harris, A. F., Khanna, V., Tuncay, G. S., & Kravets, R. H. (2016). Smart LaBLEs: Proximity, Autoconfiguration, and a Constant Supply of Gatorade(TM). *2016 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC)*, 142-154. <https://doi.org/10.1109/SEC.2016.43>
- Hassan, A. A., Al-Shamaa, N. K., & Abdalla, K. K. (2017). *Comparative Study of Conventional and Optimal PID Tuned Methods for PMDCM Speed Control*. 12(24), 9.
- Hébuterne, S., & Pérochon, S. (2014). *Android: Guía de desarrollo de de aplicaciones para smartphones y tabletas* (2ª ed.). ENI. (B.Hypatia-Sala SIST OP 17(1)).
- Issitt, M. L. (2018). Ios. En *Salem Press Encyclopedia of Science*. Salem Press.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 4, 1942-1948 vol.4. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>



Kurose, J. F., Ross, K. W., & Paul, G. (2013). *Computer networking: A top-down approach* (6th ed.). Pearson. (B.Hypatia-Sala INTERNET 45(7)).

Larman Craig. (2005). *Applying Uml and Patterns an Introduction to Objectoriented Analysis and Design and Iterative Development*. Prentice Hall PTR.

Mulligan, G. (2007). The 6LoWPAN Architecture. *Proceedings of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors*, 78–82. <https://doi.org/10.1145/1278972.1278992>

Nair, K., Kulkarni, J., Warde, M., Dave, Z., Rawalgaonkar, V., Gore, G., & Joshi, J. (2015). Optimizing power consumption in iot based wireless sensor networks using Bluetooth Low Energy. *2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT)*, 589-593. <https://doi.org/10.1109/ICGCIoT.2015.7380533>

Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación.

Orady, A. E., & Stott, B. G. (2018). *United States Patent N.º US20180021616A1*. Recuperado de <https://patents.google.com/patent/US20180021616A1/en>

Pérez, J. D. G., Payá, A. S., Fernández, D. R., Sánchez, S. H., & Alonso, O. M. (2012). Ubiquitous Low-cost Sports Training System for Athletes. *Proceedings of the 6th Euro American Conference on Telematics and Information Systems*, 105–112. <https://doi.org/10.1145/2261605.2261621>

Reyes Cortés, F., & Cid Monjaraz, J. (2015). *Arduino: Aplicaciones en robótica, mecatrónica e ingenierías*. Marcombo. (B.Hypatia-Sala MICRO 15(1)).

Shi, Y., & Eberhart, R. (1998). A modified particle swarm optimizer. *1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World*

*Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360)*, 69-73.

<https://doi.org/10.1109/ICEC.1998.699146>

Sommerville, I. (2016). *Software engineering* (10th ed.). Pearson. (B.Hypatia-Sala PROG 88(4)).

Tomás Gironés, J. (2013). *El gran libro de Android* (3ª ed.). Marcombo. (B.Hypatia-Sala SIST OP 26(1)).

Williamson, H., Moreno Blázquez, Á., Moreno Díaz, P., & Sánchez Allende, J. (2001). *XML: Manual de referencia*. McGraw-Hill. (B.Hypatia-Sala LENG MARC 12(1)).

Wixted, A. J., Kinnaird, P., Larijani, H., Tait, A., Ahmadiania, A., & Strachan, N. (2016). Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks. *2016 IEEE SENSORS*, 1-3. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808712>

Zhang, Q., Li, H., & Wang, L. (2006). Design of BLDCM Driving and Control System for Motorized Treadmill. *2006 International Conference on Mechatronics and Automation*, 2144-2149. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2006.257625>







## Relación de documentos

<input checked="" type="checkbox"/> Memoria .....	201	páginas
<input type="checkbox"/> Anexos .....		páginas

La Almunia, a 26 de noviembre de 2019

Firmado: Pablo Pérez Castro





**Escuela Universitaria  
Politécnica - La Almunia**  
Centro adscrito  
**Universidad Zaragoza**

Nº TFG:

**TFG Nº: 424.19.32**

Director:

Fdo:

Javier Esteban  
Escaño

Título TFG:

**Estudio y modificación de una cinta de fitness**

Autor:

Pablo Pérez Castro

Noviembre de 2019



**Escuela Universitaria  
Politécnica - La Almunia**  
Centro adscrito  
**Universidad Zaragoza**

Nº TFG:

**TFG Nº: 424.19.32**

Director:

Fdo:

Javier Esteban  
Escaño

Título TFG:

**Estudio y modificación de una cinta de fitness**

Autor:

Pablo Pérez Castro

Noviembre de 2019



**Escuela Universitaria  
Politécnica - La Almunia**  
Centro adscrito  
**Universidad Zaragoza**

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA  
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

Estudio y modificación de una cinta de  
fitness

Research and Modification of a Treadmill

TFG N°: 424.19.32

Autor: Pablo Pérez Castro  
Director: Javier Esteban Escaño  
Fecha: Noviembre de 2019

