# Sistemas Operativos Anatómicos: Arquitectura Funcional, Ancho de Banda y Protocolos de Interfaz en la Ingeniería Biomecánica

## 1. Introducción: El Cuerpo Humano como Plataforma de Hardware Multicapa

En la vanguardia de la ingeniería biomédica y la Interacción Humano-Computadora (HCI, por sus siglas en inglés), ha surgido un nuevo paradigma que redefine la biología humana no como un conjunto estático de órganos, sino como una serie integrada de "Sistemas Operativos Anatómicos" (Anatomical OS). Este marco conceptual propone que el cuerpo humano puede analizarse, modelarse y aumentarse tratándolo como una plataforma modular compuesta por subsistemas funcionales distintos, cada uno con sus propias especificaciones de entrada (sensores aferentes), capacidad de procesamiento (reflejos espinales y redes neuronales), ancho de banda de salida (efectores motores) y protocolos de mantenimiento (homeostasis y hemodinámica).1

Históricamente, el diseño de interfaces tecnológicas ha sufrido de un "centrismo manual y ocular", saturando los canales visuales y manipulativos de la mano mientras deja vastas capacidades del cuerpo infrautilizadas. Sin embargo, la convergencia bio-digital y el avance de los dispositivos "wearables" (vestibles) exigen una reevaluación de estas estructuras periféricas. El pie humano, o "OS Pedal", emerge en este análisis como una estructura de ingeniería excepcionalmente compleja: es simultáneamente una superficie sensorial de alta resolución, una bomba hidráulica crítica para el retorno venoso y un sistema de palancas biomecánicas de rigidez variable.

Este reporte presenta una investigación exhaustiva sobre las arquitecturas funcionales de los OS Anatómicos, utilizando el pie como caso de estudio principal para diseccionar las capas de hardware (anatomía) y firmware (fisiología) que gobiernan nuestra interacción física. A través de un análisis comparativo con los sistemas de la mano, el ojo y la lengua, establecemos jerarquías de rendimiento basadas en la Ley de Fitts y la Teoría de la Información de Shannon, proporcionando un marco de referencia definitivo para el diseño de la próxima generación de interfaces corporales.

## 2. El "OS Pedal": Arquitectura del Sistema Operativo del Pie

El pie humano es una maravilla de la evolución biomecánica, diseñado para soportar cargas extremas mientras mantiene una sensibilidad exquisita. Para el diseñador de interfaces, el pie no debe verse simplemente como un soporte pasivo, sino como un terminal de entrada/salida (I/O) sofisticado con tres subsistemas críticos: el Sensorial, el Hemodinámico y el Biomecánico.

### 2.1 Subsistema Sensorial: La Interfaz Táctil Plantar y el Ancho de Banda Hástico

La piel glabra de la planta del pie es la única superficie del cuerpo en contacto constante con el entorno físico durante la locomoción. Funciona como una matriz de sensores distribuida que alimenta continuamente al Sistema Nervioso Central (SNC) con datos sobre textura, fricción, presión y equilibrio. La comprensión de la densidad y sintonización de estos sensores es fundamental para diseñar interfaces hápticas efectivas.3

#### 2.1.1 Especificaciones de Hardware: Mecanoreceptores Cutáneos

Al igual que la mano, la planta del pie está inervada por cuatro clases de mecanoreceptores de bajo umbral, pero su distribución espacial y respuesta en frecuencia están optimizadas para la bipedestación en lugar de la manipulación fina.

* **Adaptación Rápida Tipo I (FAI) - Corpúsculos de Meissner:** Estos sensores responden a deformaciones dinámicas de la piel y vibraciones de baja frecuencia ("flutter"). Son los responsables de detectar el deslizamiento inicial. En el pie, la densidad de unidades FAI es heterogénea: se concentran densamente en los dedos (aproximadamente 48 unidades/cm²) y en la región metatarsiana lateral, disminuyendo significativamente hacia el talón (15.7 unidades/cm²).5 Esto implica que los dedos son la "fóvea táctil" del pie, ofreciendo la mayor resolución para interfaces que requieran discriminación espacial.
* **Adaptación Rápida Tipo II (FAII) - Corpúsculos de Pacini:** Especializados en vibraciones de alta frecuencia (64–400 Hz) y aceleración. Una distinción crítica entre el "OS Manual" y el "OS Pedal" es la sintonización de frecuencia. En la mano, es posible activar selectivamente diferentes clases de aferentes variando la frecuencia del estímulo. En contraste, en la planta del pie, las aferentes FAII tienen umbrales de activación extremadamente bajos y son sensibles a través de un amplio espectro de frecuencias.3
  + **Implicación de Diseño:** Este fenómeno crea "crosstalk" o interferencia sensorial. Diseñar una plantilla háptica que intente transmitir información compleja mediante variaciones sutiles de frecuencia es ineficiente en el pie, ya que los receptores FAII "saturarán" el canal. Las interfaces efectivas deben depender de la **modulación de amplitud** y la **localización espacial** (vibración en el dedo vs. talón) en lugar de la codificación por frecuencia pura.3
* **Adaptación Lenta Tipo I (SAI) - Discos de Merkel:** Codifican la presión estática y la forma. Su distribución en el pie es crucial para monitorear el Centro de Presión (CoP) durante la postura estática. A diferencia de la mano, donde la densidad aumenta drásticamente de proximal a distal, en el pie la distribución es más uniforme en la región media, aunque mantiene picos en los dedos.5
* **Adaptación Lenta Tipo II (SAII) - Terminaciones de Ruffini:** Detectan el estiramiento de la piel (cizallamiento). Estos son vitales para percibir las fuerzas horizontales de frenado y propulsión.

#### 2.1.2 Casos de Uso Convenientes: Navegación y Resonancia Estocástica

La fisiología sensorial del pie dicta sus aplicaciones óptimas en HCI. Dado que los umbrales sensoriales son más altos que en la mano (requieren más energía para ser percibidos) y la discriminación de frecuencia es menor, el pie es ideal para **señales de guía espacial de baja resolución** pero alta importancia.

Sistemas de Navegación Háptica:

El uso de plantillas vibratorias para la navegación permite descargar los canales visuales y auditivos, que a menudo están saturados en entornos urbanos o laborales. Estudios recientes han validado la eficacia de estos sistemas:

* **Reconocimiento de Patrones:** Los usuarios pueden identificar patrones de vibración direccional con tasas de precisión superiores al 94%, demostrando que el pie es un receptor de datos confiable.8
* **La Metáfora de "Tirar" (Pull Metaphor):** En el diseño de la interacción, la metáfora cognitiva es crucial. ¿Una vibración en la izquierda significa "gira a la izquierda" o "hay un obstáculo a la izquierda"? La investigación confirma que la metáfora de "tirar" (la vibración atrae al usuario, como una correa invisible) combinada con un enfoque de corrección del "peor eje primero" (corregir la desviación más grande antes de refinar la trayectoria) resulta en la navegación peripersonal más eficiente y rápida.6 Esto es aplicable tanto en entornos de realidad virtual como en asistencia para personas con discapacidad visual.9

Aumentación Mediante Resonancia Estocástica:

Una aplicación bio-hack del OS Sensorial es el uso de ruido sub-umbral. Aplicar una vibración mecánica aleatoria (ruido) a la planta del pie, a una intensidad justo por debajo del umbral de percepción consciente, puede mejorar la detección de señales débiles por parte de los mecanoreceptores mediante el fenómeno de resonancia estocástica. Esto ha demostrado mejorar el control postural en ancianos y pacientes con neuropatía diabética, efectivamente "overclockeando" el hardware sensorial degradado para restaurar la función.3

### 2.2 Subsistema Hemodinámico: La Ingeniería Hidráulica del Retorno Venoso

Más allá de la sensación y el soporte, el pie funciona como el motor periférico del sistema circulatorio. El "OS Hemodinámico" de la extremidad inferior enfrenta el desafío físico de devolver la sangre venosa al corazón contra la gravedad. Este sistema no es pasivo; es una bomba activa sincronizada con la marcha.

#### 2.2.1 Debugging Anatómico: El Plexo de Lejars vs. Las Venas Plantares Profundas

Durante más de un siglo, la comprensión médica de este sistema estuvo dominada por el concepto de la "Suela Venosa de Lejars", descrita en 1888 como una red masiva de venas superficiales que actuaban como reservorio. Sin embargo, investigaciones anatómicas modernas utilizando inyecciones de látex y disección cadavérica han corregido este modelo.10

* **El Error Histórico:** Lejars inyectó las venas a alta presión, dilatando artificialmente los vasos superficiales y creando un artefacto anatómico. En un pie sano, la red superficial es delgada y no constituye el mecanismo principal de bombeo.
* **La Arquitectura Real:** El verdadero "corazón periférico" reside en las **venas plantares laterales y mediales profundas**. Estas venas están ubicadas estratégicamente entre las capas musculares del pie (como el cuadrado plantar y el flexor corto de los dedos). Tienen un volumen de eyección aproximado de 25 ml.
* **El Ciclo de Bombeo:**
  1. **Fase de Llenado (Diástole):** Durante la fase de oscilación de la marcha (swing phase), el pie está relajado y sin carga. La presión negativa aspira la sangre de los dedos y la red superficial hacia las venas profundas.
  2. **Fase de Eyección (Sístole):** En el momento del golpe de talón y el apoyo medio, el aplanamiento del arco plantar y la contracción muscular comprimen violentamente las venas profundas contra los huesos, eyectando la sangre hacia las venas tibiales posteriores con un aumento significativo en la velocidad de flujo.10

#### 2.2.2 Aplicaciones: Modulación Hemodinámica y Recuperación Activa

La comprensión de que la bomba es profunda y mecánica permite el desarrollo de tecnologías vestibles que se interconectan con este OS para prevenir patologías o mejorar el rendimiento.

Compresión Neumática Intermitente (IPC) Sincronizada:

Para pacientes inmovilizados (post-cirugía, ictus) donde el "software" motor falla, el hardware venoso corre el riesgo de estasis y trombosis venosa profunda (TVP). Los dispositivos modernos de compresión no solo aprietan; replican la onda peristáltica fisiológica.

* **Sincronización con la Marcha:** Nuevos dispositivos, como el sistema LISA, sincronizan la compresión neumática externa con ejercicios activos de tobillo. Esta coordinación bio-mecánica maximiza la velocidad pico de la vena femoral, superando significativamente a la compresión estática o al ejercicio solo.14
* **Botas de Recuperación (Peristaltic Pulse Dynamic Compression):** En el ámbito deportivo de élite, sistemas como NormaTec utilizan un algoritmo de compresión peristáltica (pulso, retención, liberación) que imita la fisiología de las válvulas venosas. Al aplicar presiones altas (hasta 200 mmHg en protocolos experimentales, aunque 80 mmHg es estándar), estos dispositivos aumentan el aclaramiento de lactato y metabolitos, mejorando la flexibilidad aguda y reduciendo el umbral de dolor por presión.15

Tejidos Activos y Aleaciones con Memoria de Forma (SMA):

La frontera de esta tecnología es la eliminación de las bombas de aire externas. Investigaciones recientes han desarrollado medias de compresión "activas" tejidas con alambres de Aleación con Memoria de Forma (como el Nitinol). Al aplicar calor o una corriente eléctrica, la estructura del tejido se contrae dinámicamente, generando una presión controlable y móvil. Esto permite crear una "segunda piel" que bombea activamente sangre sin el volumen de los sistemas neumáticos tradicionales.18

### 2.3 Subsistema Biomecánico: Dinámica Estructural y Cosecha de Energía

El "OS Biomecánico" del pie es un sistema de rigidez variable. Su función principal es la conversión de energía: disipar el impacto al aterrizar y transmitir fuerza al despegar.

#### 2.3.1 El Mecanismo de Windlass: Lógica Mecánica Analógica

El pie opera mediante una "lógica mecánica" intrínseca conocida como el Mecanismo de Windlass.

* **Estado 0 (Flexible):** Durante el contacto inicial, la fascia plantar está relajada, permitiendo que los huesos del tarso se desbloqueen. El pie actúa como un amortiguador adaptable.
* **Estado 1 (Rígido):** Al final de la fase de apoyo, los dedos se extienden (dorsiflexión). Esto tensa la fascia plantar alrededor de las cabezas de los metatarsianos (como un cable en un cabrestante), acortando el arco y bloqueando los huesos en una palanca rígida para la propulsión.
* **Relevancia en Diseño:** Las interfaces robóticas (exotrajes) y las prótesis deben respetar esta transición de estado. Intentar actuar sobre el pie rígido en la fase incorrecta causa ineficiencia y daño. Los exotrajes blandos modernos utilizan cables textiles para asistir a la flexión plantar precisamente en esta fase de empuje, reduciendo el coste metabólico de la marcha en pacientes con ictus.21

#### 2.3.2 Cosecha de Energía (Energy Harvesting): El OS de Potencia

Cada paso humano disipa aproximadamente 500 Joules de energía, la mayoría como calor o deformación. Capturar una fracción de esta energía es el "santo grial" para la alimentación de wearables.

* **Limitaciones Piezoeléctricas:** Los materiales cerámicos tradicionales (PZT) son frágiles y manejan mal las grandes deformaciones del pie. Aunque teóricamente se pueden generar cientos de milivatios, en la práctica, la baja frecuencia de la marcha humana (~1-2 Hz) limita la eficiencia a rangos de **2-8 mW**.23
* **Nanogeneradores Triboeléctricos (TENGs):** Una solución más prometedora son los TENGs, que generan electricidad mediante la fricción y separación de capas de materiales flexibles dentro del zapato. Son ligeros, duraderos y eficientes a bajas frecuencias.25
* **Caso de Uso Realista:** No cargaremos un smartphone caminando. Sin embargo, 8 mW son suficientes para alimentar sensores IoT integrados en el calzado (acelerómetros, sensores de presión, GPS intermitente) y transmitir paquetes de datos vía Bluetooth Low Energy (BLE). Esto permite la creación de "zapatos inteligentes autonsuficientes" que monitorean la salud sin necesidad de baterías externas.26

## 3. Análisis Comparativo de Ancho de Banda: Benchmarking de OS Anatómicos

Para determinar los "casos de uso convenientes" del pie, es imperativo compararlo con otros canales de salida del operador humano: la Mano, el Ojo y la Lengua. Utilizaremos la Ley de Fitts y la tasa de transferencia de información (Throughput, en bits por segundo) como métricas estándar.28

### 3.1 Tabla Comparativa de Capacidad de Canal (Throughput)

La siguiente tabla sintetiza los hallazgos de múltiples estudios de HCI sobre el rendimiento motor de diferentes efectores anatómicos.

| **OS Anatómico** | **Throughput (bits/s)** | **Ventaja Principal** | **Desventaja Principal** | **Caso de Uso Óptimo en HCI** | **Fuente** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Mano (Ratón)** | **3.0 - 5.0** | Alta destreza, control de bucle cerrado | Ocupada en tareas físicas/manipulación | Apuntado de precisión, dibujo, control complejo. | 29 |
| **Ojo (Mirada)** | **2.0 - 3.5** | Velocidad de adquisición (sacádica) | "Toque de Midas" (mirar $\neq$ clic), Jitter | Selección rápida, contexto, atención. | 30 |
| **Pie (Pedal)** | **1.5 - 2.5** | Soporte de carga, canal libre | Latencia alta, baja resolución fina | Control modal (Shift), velocidad, navegación global. | 32 |
| **Lengua (TDS)** | **0.7 - 1.5**\* | Ocultamiento, conexión directa al SNC | Invasividad social (si es visible), fatiga | Interfaz para cuadriplejia, control discreto. | 33 |

*\*Nota: El throughput de la lengua mejora significativamente con el aprendizaje, acercándose a 1.5 bits/s en usuarios expertos.*

### 3.2 Análisis de los Competidores

El OS Manual (La Referencia):

La mano posee la mayor representación cortical y la vía de conducción nerviosa más refinada. Su ancho de banda de hasta 5 bits/s permite correcciones de error en tiempo real (control de bucle cerrado) durante el movimiento. Sin embargo, en muchos escenarios (conducción, cirugía, industria), las manos están saturadas.

El OS Ocular (El Puntero Veloz):

El ojo es más rápido que la mano para llegar al objetivo, pero carece de estabilidad. El problema del "Toque de Midas" (activar algo solo por mirarlo) requiere mecanismos de confirmación (dwell time o parpadeo) que reducen su throughput efectivo. Además, el uso del ojo como controlador compite con su función como receptor de información, generando una alta carga cognitiva.30 El diámetro de la pupila es un indicador fiable de esta carga; sistemas avanzados pueden monitorear la dilatación pupilar para ajustar la dificultad de la interfaz en tiempo real.36

El OS Lingual (El Joystick Oculto):

La lengua es un efector sorprendentemente capaz. Conectada directamente al tronco encefálico por el nervio hipogloso (par craneal XII), evita la médula espinal, ofreciendo una vía de conducción rápida y robusta, incluso en pacientes con lesiones medulares altas (tetraplejia). Sistemas como el Tongue Drive System (TDS) permiten a usuarios paralizados controlar sillas de ruedas y cursores con una precisión que rivaliza y supera a los sistemas de sorbo-y-bufido (sip-and-puff).38 Estudios recientes muestran que el mapeo de control continuo (como un joystick analógico) es superior al control discreto (botones), permitiendo tareas complejas de seguimiento.34

El OS Pedal (El Modulador de Fondo):

El pie tiene un ancho de banda menor debido a su mayor masa (inercia) y mayor distancia al cerebro (latencia de conducción). No es adecuado para tareas de alta frecuencia o precisión de píxeles.

* **Coordinación Mano-Pie:** Estudios en atletas (tenistas) muestran que la coordinación experta implica un acoplamiento inverso: alta aceleración del pie se coordina con una modulación precisa de la fuerza de agarre en la mano.40
* **Interacción Multimodal:** La mayor fortaleza del pie es su capacidad para operar en "segundo plano". En tareas de interacción multimodal, el pie es excelente para **quasimodos** (mantener un estado, como un pedal de "Shift" o "Gas") mientras la mano realiza el trabajo de precisión. Esto distribuye la carga cognitiva eficazmente.32

## 4. Diseño de Interacción y Protocolos para el OS Pedal

Basándonos en la fisiología y el benchmarking, podemos derivar pautas de diseño específicas para el pie.

### 4.1 Mapeo de Gestos: Kicks vs. Taps

La investigación ha identificado distintos tipos de gestos podales y su eficacia:

* **Gestos Basados en Velocidad (Rate-based):** El pie es mejor controlando tasas (como el volumen o el zoom) que posiciones absolutas. Las interfaces que usan el pie como un joystick de velocidad son más rápidas y precisas que las que intentan mapear el pie a coordenadas X-Y de pantalla.32
* **Kicks (Patadas):** Los gestos de patada son útiles para interacciones discretas y semafóricas (comandos binarios). Sin embargo, requieren que el usuario esté de pie o tenga libertad de movimiento, lo que plantea problemas de equilibrio.
* **Interacción Sentada vs. De Pie:** La postura es la variable crítica. Sentado, el pie tiene más grados de libertad para rotación y golpeteo (tapping). De pie, el pie esclavo debe mantener el equilibrio, limitando la interacción a cambios de presión o pequeños gestos de los dedos, a menos que se use soporte externo.32

### 4.2 La Interfaz "Earable": Un OS Complementario

Un desarrollo emergente es el uso de "Earables" (dispositivos en el oído) para detectar gestos faciales y de la cabeza. Sensores integrados en auriculares pueden detectar la deformación del canal auditivo causada por movimientos de la mandíbula o expresiones faciales.

* **Detección de Gestos:** Sistemas como *CochlearMotion* utilizan señales acústicas inaudibles (sonar) dentro del canal auditivo para clasificar movimientos de la cabeza con >95% de precisión.43
* **Comandos Silenciosos:** El sistema *MuteIt* utiliza IMUs en el oído para reconocer comandos de voz no vocalizados (movimiento mandibular) con alta precisión, ofreciendo un canal de entrada privado que complementa al pie y la mano.44

## 5. Aplicaciones Clínicas e Industriales: "Hacking" del OS Anatómico

La integración tecnológica con el OS Pedal permite aplicaciones que van desde el diagnóstico preventivo hasta la rehabilitación neurológica avanzada.

### 5.1 El OS Diagnóstico: Ecosistemas de Plantillas Inteligentes

La integración de matrices de sensores de presión (capacitivos, piezoresistivos) en plantillas convierte al calzado en un laboratorio de marcha continuo.

* **Prevención de Úlceras Diabéticas:** La neuropatía diabética elimina el feedback sensorial de dolor, permitiendo que se formen úlceras por presión. Plantillas inteligentes monitorean continuamente los puntos calientes de presión y la temperatura. Algoritmos predictivos pueden alertar al paciente para que cambie su postura o descanse *antes* de que ocurra el daño tisular.45
* **Análisis de Marcha y Fatiga:** La fatiga muscular altera sutilmente la biomecánica de la marcha (cambios en el CoP, asimetría). Sistemas vestibles pueden detectar estos cambios en tiempo real, sirviendo como sistemas de alerta temprana para trabajadores industriales o atletas para prevenir lesiones.45

### 5.2 El OS Aumentado: Robótica Blanda (Soft Robotics)

La transición de ortesis rígidas a sistemas "blandos" representa una evolución hacia la biomimética.

* **Exotrajes Textiles:** A diferencia de los exoesqueletos rígidos que "llevan" al paciente, los exotrajes blandos (como el sistema ReStore) utilizan cables Bowden y textiles funcionales para aplicar fuerza en paralelo a los músculos biológicos. Estos sistemas asisten selectivamente la flexión plantar durante el despegue y la dorsiflexión durante la oscilación, corrigiendo la caída del pie (foot drop) en sobrevivientes de ictus. El resultado es una marcha más rápida, simétrica y metabólicamente eficiente.21
* **Mecanismo de Actuación:** Estos dispositivos son ligeros porque trasladan los motores y baterías a la cintura, transmitiendo la fuerza al tobillo mediante cables, respetando la necesidad de mantener baja la masa distal de la extremidad para no aumentar la inercia.49

### 5.3 Neuromodulación: Acceso de Raíz (Root Access)

La intervención más profunda en el Anatomical OS es la modulación directa de las señales nerviosas.

* **Estimulación del Nervio Tibial (PTNS):** El nervio tibial (accesible en el tobillo) comparte raíces sacras (S2-S4) con la inervación de la vejiga y el suelo pélvico. La estimulación eléctrica percutánea de este nervio "hackea" el plexo sacro para tratar la vejiga hiperactiva, demostrando que el OS Pedal tiene conectividad funcional con órganos viscerales distantes.50
* **Reflexología y Evidencia fMRI:** Aunque la reflexología tradicional es a menudo descartada, estudios modernos de resonancia magnética funcional (fMRI) han mostrado resultados intrigantes. La estimulación mecánica de zonas específicas del pie (por ejemplo, el área asociada al ojo en los mapas de reflexología) ha demostrado activar las correspondientes áreas corticales sensoriales y visuales en el cerebro.51 Esto sugiere la existencia de una somatotopía latente que podría ser explotada para nuevas terapias de neuromodulación no invasiva.
* **Estimulación Vagal (VNS):** Similarmente, la estimulación del nervio vago (VNS), accesible en el oído o cuello, actúa como un regulador maestro de la inflamación y la plasticidad cerebral. Su uso combinado con rehabilitación motora mejora la recuperación post-ictus, facilitando la reconexión de los circuitos motores dañados.54

### 5.4 Human-as-a-Platform: Convergencia Bio-Digital

La visión final es la del "Humano como Plataforma". En este modelo, el cuerpo aloja una red de área personal (BAN) donde:

1. El **Pie** genera energía (Power Supply) y monitorea la salud estructural.
2. El **Oído** (Earable) gestiona la autenticación biométrica y la interfaz de voz/gesto.
3. La **Mano** ejecuta tareas de alta precisión.
4. El **Sistema Hemodinámico** es gestionado activamente por tejidos inteligentes para optimizar la termorregulación y la recuperación.

## 6. Conclusiones

La investigación de los "Sistemas Operativos Anatómicos" revela que el diseño de interfaces exitosas no se trata de imponer tecnología sobre el cuerpo, sino de decodificar y aprovechar las arquitecturas funcionales preexistentes.

El **OS Pedal** se define por su robustez, su capacidad de carga y su conexión rítmica con el entorno. Sus casos de uso convenientes no son la manipulación fina (territorio de la mano), sino la **navegación háptica**, la **modulación de estados (modal switching)**, la **cosecha de energía** y el **diagnóstico pasivo de salud**.

Al respetar las limitaciones de ancho de banda del pie y potenciar sus fortalezas hidráulicas y mecánicas, la bioingeniería puede cerrar el bucle entre el agente biológico y su extensión digital, creando sistemas híbridos que no solo asisten, sino que verdaderamente aumentan la capacidad humana.

### Tabla Resumen: Especificaciones del OS Pedal

| **Capa del Sistema** | **Componente Biológico** | **Función Nativa** | **Aumentación Tecnológica (Caso de Uso)** |
| --- | --- | --- | --- |
| **Hardware** | Huesos (26), Articulaciones (33) | Soporte Estructural, Palancas | Exotrajes Blandos, Ortesis de Fibra de Carbono |
| **Hidráulica** | Venas Plantares Profundas | Bomba de Retorno Venoso | Compresión Neumática (NormaTec), Medias SMA Activas |
| **Sensores** | FAI (Dedos), FAII (Planta), SAI | Textura, Deslizamiento, Presión | Plantillas Hápticas de Navegación, Monitoreo de Úlceras |
| **Energía** | Tendón de Aquiles, Arcos | Almacenamiento Elástico | Cosechadores Piezoeléctricos y Triboeléctricos (TENGs) |
| **Conectividad** | Nervio Tibial (L4-S3) | Transmisión de Datos Motores | Neuromodulación (PTNS) para control visceral |
| **Lógica** | Mecanismo de Windlass | Rigidez Variable Automática | Calzado de rigidez adaptativa, Prótesis dinámicas |

#### Works cited

1. Human Augmentation – The Dawn of a New Paradigm - GOV.UK, accessed December 19, 2025, <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/609d23c6e90e07357baa8388/Human_Augmentation_SIP_access2.pdf>
2. 2022 AEP Team Abstracts - Homeland Security, accessed December 19, 2025, <https://www.dhs.gov/sites/default/files/2023-01/2022%20AEP%20Synopsis_508v2.pdf>
3. The firing characteristics of foot sole cutaneous mechanoreceptor afferents in response to vibration stimuli - PMC - PubMed Central, accessed December 19, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5626905/>
4. Cutaneous afferent innervation of the human foot sole: what can we learn from single-unit recordings? - PubMed Central, accessed December 19, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6171067/>
5. Innervation densities for the palmar surface of the human hand (A) and... - ResearchGate, accessed December 19, 2025, <https://www.researchgate.net/figure/nnervation-densities-for-the-palmar-surface-of-the-human-hand-A-and-the-plantar-surface_fig1_344370382>
6. Navigating with Haptic Gloves: Investigating Strategies for Horizontal and Vertical Movement Guidance - arXiv, accessed December 19, 2025, <https://arxiv.org/html/2503.23484v1>
7. Distribution and behaviour of glabrous cutaneous receptors in the human foot sole - NIH, accessed December 19, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2290100/>
8. Tactile-Foot Stimulation Can Assist the Navigation of People with Visual Impairment - NIH, accessed December 19, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4745435/>
9. HaptiSole: Wearable Haptic System in Vibrotactile Guidance Shoes for Visually Impaired Wayfinding - KoreaScience, accessed December 19, 2025, <https://www.koreascience.kr/article/JAKO202305234897629.page?&lang=en>
10. The plantar venous pump: Anatomy and physiological hypotheses - Servier - PhlebolymphologyServier – Phlebolymphology, accessed December 19, 2025, <https://www.phlebolymphology.org/the-plantar-venous-pump-anatomy-and-physiological-hypotheses/>
11. Venous plantar plexus: Clinical and surgical implications, accessed December 19, 2025, <https://raaot.org.ar/index.php/AAOTMAG/article/download/916/1079/>
12. The plantar venous pump: Anatomy and physiological hypotheses - ResearchGate, accessed December 19, 2025, <https://www.researchgate.net/publication/286558517_The_plantar_venous_pump_Anatomy_and_physiological_hypotheses>
13. Venous outflow of the leg: anatomy and physiologic mechanism of the plantar venous plexus - PubMed, accessed December 19, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8918329/>
14. A novel device for lower leg intermittent pneumatic compression synchronized with active ankle exercise for prevention of deep vein thrombosis - PubMed, accessed December 19, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35465783/>
15. (PDF) Peristaltic Pulse Dynamic Compression of the Lower Extremity Enhances Flexibility, accessed December 19, 2025, <https://www.researchgate.net/publication/257205629_Peristaltic_Pulse_Dynamic_Compression_of_the_Lower_Extremity_Enhances_Flexibility>
16. Peristaltic Pulse Dynamic Compression by Liam Sutton - Athletic Lab, accessed December 19, 2025, <https://www.athleticlab.com/peristaltic-pulse-dynamic-compression-by-liam-sutton/>
17. Hemodynamic Effects of Intermittent Pneumatic Compression on Athletes: A Double-Blinded Randomized Crossover Study - PubMed, accessed December 19, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39043362/>
18. Active Knit Compression Stockings - Available Technologies, accessed December 19, 2025, <https://license.umn.edu/product/active-knit-compression-stockings>
19. Usability and Performance Comparison of Active Shape Memory and Passive Stockings for Medical Compression | J. Med. Devices, accessed December 19, 2025, <https://asmedigitalcollection.asme.org/medicaldevices/article/18/2/021003/1199790/Usability-and-Performance-Comparison-of-Active>
20. An active compression bandage based on shape memory alloys: a preliminary investigation - PubMed, accessed December 19, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25212902/>
21. ReStore™ Soft Exo-Suit For Stroke Rehabilitation - Lifeward, accessed December 19, 2025, <https://golifeward.com/products/restore-exo-suit/>
22. Soft Robotic Exosuit Helps Stroke Survivors Walk Faster and Farther - Boston University, accessed December 19, 2025, <https://www.bu.edu/sargent/soft-robotic-exosuit-makes-stroke-survivors-walk-faster-and-farther/>
23. Complete Beginner: How do I successfully work out how much energy a piezoelectric generator can harvest inside a shoe? : r/AskEngineers - Reddit, accessed December 19, 2025, <https://www.reddit.com/r/AskEngineers/comments/11wthth/complete_beginner_how_do_i_successfully_work_out/>
24. A Review of Piezoelectric Footwear Energy Harvesters: Principles, Methods, and Applications - PMC - PubMed Central, accessed December 19, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10346551/>
25. Triboelectric Nanogenerator Enabled Smart Shoes for Wearable Electricity Generation - PMC - PubMed Central, accessed December 19, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7877399/>
26. Smart insoles could detect disease, correct posture in real time - Medical Economics, accessed December 19, 2025, <https://www.medicaleconomics.com/view/smart-insoles-could-detect-disease-correct-posture-in-real-time>
27. A wireless, self-powered smart insole for gait monitoring and recognition via nonlinear synergistic pressure sensing - NIH, accessed December 19, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12002114/>
28. What is Fitts' Law? | IxDF - The Interaction Design Foundation, accessed December 19, 2025, <https://www.interaction-design.org/literature/topics/fitts-law>
29. Fitts' Law - York University, accessed December 19, 2025, <https://www.yorku.ca/mack/hhci2018.html>
30. A Fitts' Law Study of Click and Dwell Interaction by Gaze, Head and Mouse with a Head-Mounted Display - York University, accessed December 19, 2025, <https://www.yorku.ca/mack/etra2018.html>
31. Evaluation of Eye Gaze Interaction - Department of Computer Science, accessed December 19, 2025, <https://www.cs.tufts.edu/~jacob/papers/chi00.sibert.pdf>
32. [PDF] The Feet in HCI : A Survey of Foot-Based Interaction ..., accessed December 19, 2025, <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Feet-in-HCI-%3A-A-Survey-of-Foot-Based-Velloso-Schmidt/96f2b16fbf0869f6b21eb7712b93f80b10a18c10>
33. The Tongue Enables Computer and Wheelchair Control for People with Spinal Cord Injury, accessed December 19, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4454612/>
34. Continuous Tongue Robot Mapping for Paralyzed Individuals Improves the Functional Performance of Tongue-Based Robotic Assistance - PubMed, accessed December 19, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33513095/>
35. Cognitive load affects gaze dynamics during real-world tasks - PMC - PubMed Central, accessed December 19, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11876210/>
36. Cognitive Workload Assessment via Eye Gaze and EEG in an Interactive Multi-Modal Driving Task, accessed December 19, 2025, <https://hrilab.tufts.edu/publications/aygunetal22icmi.pdf>
37. Cognitive Load Prediction From Multimodal Physiological Signals Using Multiview Learning, accessed December 19, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38133973/>
38. Tongue Drive Wheelchair - News Center Features | Georgia Institute of Technology, accessed December 19, 2025, <https://news.gatech.edu/archive/features/tongue-drive-wheelchair.shtml>
39. This Wheelchair Is Controlled By a Paralyzed Patient's Tongue - Smithsonian Magazine, accessed December 19, 2025, <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/this-wheelchair-is-controlled-by-a-paralyzed-patients-tongue-180947870/>
40. Exploring Difference in Hand–Foot Coordination Ability Among Tennis Players of Different Sport Levels Based on the Correlation Between Lower-Limb Acceleration and Hand Grip Force - MDPI, accessed December 19, 2025, <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/16/5152>
41. Multimodal Hand and Foot Gesture Interaction for Handheld Devices - ResearchGate, accessed December 19, 2025, <https://www.researchgate.net/publication/270099391_Multimodal_Hand_and_Foot_Gesture_Interaction_for_Handheld_Devices>
42. Understanding Feet Interaction, accessed December 19, 2025, <https://haifahci.net/projects/feet/>
43. CochlearMotion: Head Gesture Recognition Leveraging Ear Canal Deformation Sensing - ScholarSpace, accessed December 19, 2025, <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/bitstreams/cb7fa89c-fa37-4e5b-9e8c-51c6a6bee12f/download>
44. 140 MuteIt: Jaw Motion Based Unvoiced Command Recognition Using Earable, accessed December 19, 2025, <https://people.cs.umass.edu/~phuc/papers/MuteIt_UbiComp22.pdf>
45. Effectiveness of Using a Digital Wearable Plantar Pressure Device to Detect Muscle Fatigue: Within-Subject, Repeated Measures Experimental Design - PMC - NIH, accessed December 19, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11731697/>
46. Technology and Smart Wearables in Diabetic Foot Management, accessed December 19, 2025, <https://www.hmpgloballearningnetwork.com/site/podiatry/technology-and-smart-wearables-diabetic-foot-management>
47. Flexible Smart Insole and Plantar Pressure Monitoring Using Screen-Printed Nanomaterials and Piezoresistive Sensors | ACS Applied Materials & Interfaces, accessed December 19, 2025, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.5c08296>
48. The Smart-Insole Dataset: Gait Analysis Using Wearable Sensors with a Focus on Elderly and Parkinson's Patients - PubMed Central, accessed December 19, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8073163/>
49. Soft Exosuits | Harvard Biodesign Lab, accessed December 19, 2025, <https://biodesign.seas.harvard.edu/soft-exosuits>
50. Percutaneous Tibial Nerve Stimulation (PTNS) | CU Urogynecology CO - Colorado Womens Health, accessed December 19, 2025, <https://urogyn.coloradowomenshealth.com/treatments/ptns.html>
51. fMRI Research | Reflexology Research Project, accessed December 19, 2025, <https://www.reflexology-research.com/fmri-research/>
52. Reflex area stimulated in the fMRI experiment. Detailed legend:... - ResearchGate, accessed December 19, 2025, <https://www.researchgate.net/figure/Reflex-area-stimulated-in-the-fMRI-experiment-Detailed-legend-Location-of-the-eye_fig1_236947792>
53. FMRI Brain Scan Reflexology Study 2024 - Maine Council of Reflexologists, accessed December 19, 2025, <https://www.reflexologyofmaine.org/post/fmri-brain-scan-reflexology-study-2024>
54. Vagus nerve stimulation - Mayo Clinic, accessed December 19, 2025, <https://www.mayoclinic.org/tests-procedures/vagus-nerve-stimulation/about/pac-20384565>
55. Vagus nerve stimulation: How it works, approved uses | Northwell Health, accessed December 19, 2025, <https://feinstein.northwell.edu/news/insights/vagus-nerve-stimulation>