

1 INTRODUCCION

Este capítulo de introducción trata de plantear el problema del que se parte para trabajar en este proyecto. También se describe la estructura de la presente memoria, así como la metodología seguida para llevar a cabo el proyecto.

1.1 Presentación del problema

En este apartado se expondrá la problemática que puede surgir ante una mala colocación del pie durante la pisada y la importancia que puede tener la corrección de esta última para diferentes personas como deportistas o personas diabéticas. Por otro lado, se hará una breve descripción de los sistemas de medida de presión plantar existentes y las tendencias actuales.

La planta del pie sufre la aplicación de importantes presiones influenciadas por muchos factores como la locomoción, la velocidad, etc, así como por parámetros relativos al sujeto, tales como el peso corporal, la edad, posibles patologías, etc. El estudio de estas presiones posibilita la localización de las zonas que muestran los mayores valores y su cuantificación. Las zonas de talón y cabezas de los metatarsianos presentan las presiones más elevadas.

Durante la locomoción, las fuerzas que se aplican sobre el calzado, que actúa como interfaz entre la persona y la superficie del suelo, corresponden al peso corporal y a la fuerza ejercida por los músculos, que es transmitida a los huesos a través de los tendones. Las fuerzas de reacción, que son las registradas por las plataformas de fuerzas, son idénticas a las anteriores, pero en sentido contrario. El vector de la fuerza de reacción se suele descomponer en sus tres componentes ortogonales (vertical, anteroposterior y transversal). En la 1 se puede observar cómo se produce la distribución de fuerzas al caminar, donde en la curva de fuerza vertical F_z al caminar típicamente aparecen dos picos: el primero, durante el contacto del talón y el segundo, durante el impulso.

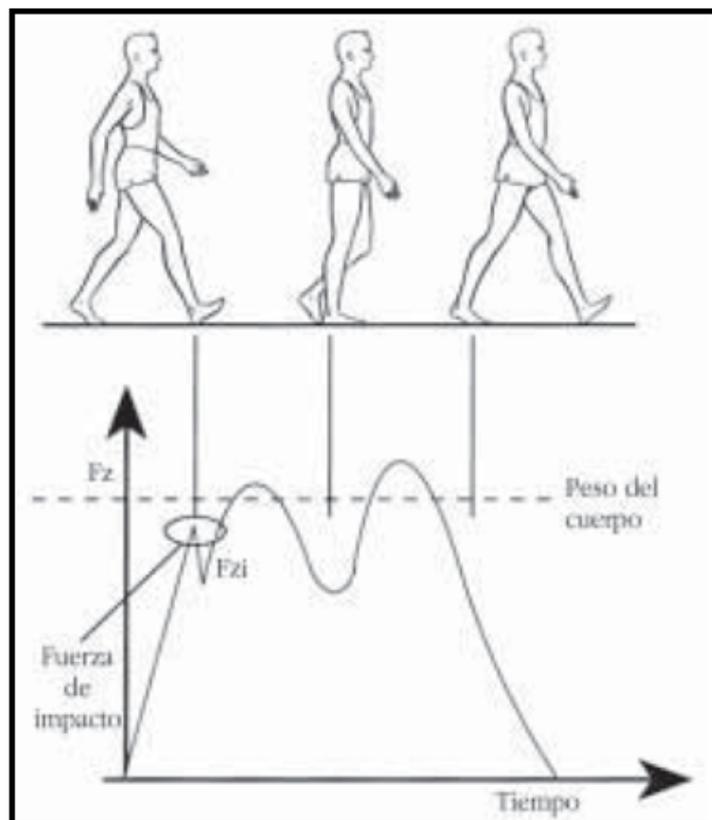


Figura 1. Distribución de las fuerzas verticales que se producen al caminar

Normalmente se estudian las fuerzas horizontales (anteroposterior y transversal) para problemas de interacción entre la suela/superficie del suelo en términos de adherencia. Las fuerzas verticales se ensayan especialmente para todos los aspectos relacionados con la amortiguación del calzado. En cuanto a la localización de las fuerzas, la trayectoria del punto de aplicación de la fuerza resultante de la masa corporal comienza en el momento de impacto, en la zona central del talón. Después, se desplaza rápidamente en línea recta hasta la primera y segunda cabezas metatarsianas, gira hacia dentro y se mueve lentamente hasta la base del primer dedo. Finaliza en la punta del primer o segundo dedos, o entre ambos.

Al caminar: Al inicio (fase de contacto), se observa una fuerza vertical máxima (F_z). El talón se encuentra en contacto con el suelo, lo que reduce la progresión hacia delante del pie. Esto implica una reacción hacia atrás. Dada la posición inicial del pie en supinación, las fuerzas anteroposteriores (F_x) son negativas y, a medida que comienza el movimiento de pronación, las fuerzas F_x llegan hasta cero, convirtiéndose después en positivas, hasta que finaliza el contacto del pie. A continuación (fase de soporte), se produce una caída de fuerza vertical. Esto acontece cuando el pie está en plano y corresponde al cambio del período de frenada del impulso anterior. Durante este período, el pie no desarrolla fuerzas transversales (F_y), pero debe asegurar una estabilidad transversal. Finalmente durante la fase de impulso, las fuerzas están orientadas hacia arriba y hacia delante.

Las fuerzas de reacción del suelo se expresan frecuentemente normalizadas al peso corporal (PC). Las fuerzas observadas al correr son superiores a las que aparecen al caminar. Normalmente, el pico de fuerza máxima F_z en el talón del pie al caminar oscila entre 2,5 y 4 PC, aunque en ciertos casos, puede ser superior: por ej. jugando al baloncesto, al saltar la fuerza de impacto vertical puede alcanzar de 7 a 9 PC. Al caminar, F_z oscila de 1 a 1,5 PC.

El estudio de las fuerzas en la planta del pie ha llegado a ser algo común, especialmente la fuerza vertical F_z . Los tres componentes de la fuerza de reacción con el suelo proporcionan tipos de información muy diferentes: las fuerzas F_z se utilizan para todos los aspectos de amortiguación, y las fuerzas F_y y F_x , para todos los aspectos relativos a la adherencia.

Al igual que ocurre con las presiones, existen muchos factores que influyen en la fuerza máxima como son la locomoción, la velocidad, el suelo, así como parámetros relativos al sujeto, como el peso corporal, la edad, patologías... El estudio de estas fuerzas hace posible localizar zonas (incluyendo el punto de aplicación de las fuerzas) que muestran los valores más elevados de presión y, además, cuantificar estos valores.

Las medidas de las presiones del pie se hacen necesarias para eliminar factores negativos como las úlceras neuropáticas, las cuales constituyen uno de los principales problemas clínicos del paciente diabético, o una mala actividad biomecánica en el caso de deportistas. Se pueden distinguir dos tipos de esfuerzo mecánico:

- a) *Fuerza aplicada* de forma vertical sobre la superficie plantar.
- b) *Fuerza paralela* o de cizalla a la superficie plantar.

Mientras que "la fuerza vertical" es causa de heridas en los tejidos al comprimirlos de forma repetida, "las fuerzas de cizalla" provocan el deslizamiento de los tejidos profundos sobre los superficiales. La combinación de acciones de estas dos fuerzas puede provocar necrosis de los tejidos y ulceración.

Comercialmente todavía no se dispone de dispositivos para medir la presión normal y de cizalla de forma simultánea en el interior del calzado. Los resultados de algunos proyectos de investigación y desarrollo realizados recientemente no ofrecen soluciones a este problema debido al tamaño de los sensores empleados, que aconsejan sólo su uso en ambientes de investigación clínica muy controlada. Se cree que la medición del "esfuerzo de cizalla" contribuirá a la comprensión necesaria de uno de los orígenes de las úlceras y una mala actividad biomecánica. Esto es algo que todavía no está probado, ya que no existen buenos modelos para la prevención y curación de las úlceras o corrección de mala actividad biomecánica, así como del comportamiento de la piel y los tejidos bajo presión normal y de cizalla.

Las técnicas de medida que permiten medir la presión plantar sobre la planta del pie dentro del zapato contribuyen a un mejor tratamiento del paciente. Los problemas en los pies relacionados con la presión se manifiestan principalmente en dolor, callosidad excesiva, úlceras neuropáticas y de decúbito. La aparición de sistemas de medida de presión, dentro del zapato, ha hecho posible la comprensión de una parte fundamental de los problemas de los pies. Es decir, problemas en los pies relacionados con la presión, si bien esta variable no explica al 100% la evolución de estas patologías.

Es importante conocer los valores de los sistemas de medida en relación a los valores de fuerzas y cómo valorar dichos datos. Sin embargo, hay que recordar que existe una diferencia entre la distribución de presión real y medida. La presión real es la fuerza local debajo del pie o fuerza total en la estructura del pie a través de la piel y tejidos blandos sobre la superficie de pisada. La presión medida es la fuerza local sobre el área de medida del sensor. Las diferencias entre las presiones *real* y *medida* están provocadas por:

- Diferencias entre el área real de la suela y el área cubierta por sensores
- Precisión del sensor de medida
- Dimensiones de los sensores de medida
- El número de sensores
- La distribución de sensores en la zona de medida
- La frecuencia de medida (número de valores por segundo)
- Las propiedades de la zona de medida:
 - Rígida – flexible
 - Gruesa – fina

La distribución de presiones en una persona al caminar depende de:

- La forma de flexionar y levantar el pie de la superficie
- El modo de caminar de la persona (de forma repetida, estable, insegura, forzada, rápida, lenta, recta, con curvas)
- Anatomía y psicología de la persona
- Enfermedades y trastornos.

Se han desarrollado diversos sensores para medir la presión máxima sobre una superficie de contacto. Los más utilizados son los siguientes:

1. *Sensores eléctricos de presión*: se trata de diversas células eléctricas de medición que funcionan dependiendo de los cambios en resistencia, y la capacidad o inducción del sensor, provocado por cambios de presión. Se distinguen los siguientes tipos:
 - Resistivo
 - Piezoresistente
 - Capacitativo
 - Piezoeléctrico
 - Sensor de fuerza

Los dos primeros tienen un inconveniente, ya que el material debe ser bastante blando para poder asegurar la sensibilidad a la presión. No obstante, el comportamiento de los materiales blandos, a menudo dependen del tiempo (viscoelasticidad).

2. *Sensores neumáticos*: el principio de estos sensores se basa en células hinchables. Dichos sensores comienzan a registrar la presión en cuanto la presión interna y externa de las células hinchables ha alcanzado un equilibrio. Son insensibles a las fuerzas de cizalla y a la temperatura, son relativamente baratos, se pueden realizar en diversos tamaños sin manipular el grosor, son finos, flexibles y fáciles de usar. La ventaja de la flexibilidad, disminuye por un cambio en la respuesta del sensor si se encuentra colocado en una superficie con una curva pronunciada. El inconveniente es que la frecuencia de medida es muy baja: alrededor de 5 Hz máx.

Por otro lado existen diferentes sistemas de medida para valorar la distribución de presión/fuerza. Los más utilizados son los siguientes:

1. **Rígido:** plataformas de fuerza. Una plataforma de fuerza construida sobre una superficie permite llevar a cabo la medida de fuerzas normales y de cizalla de la carga aplicada. La plataforma de fuerza se utiliza, entre otras cosas, para localizar la proyección del centro de gravedad del cuerpo.

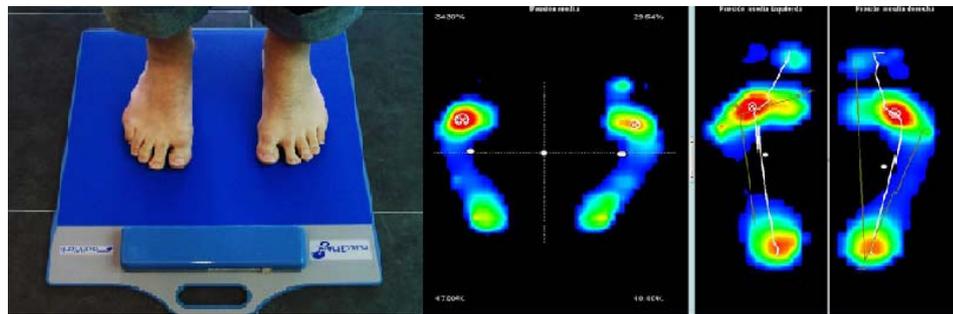


Figura 2. Sistema de medida Rígido

2. **Flexible:**

- Alfombras neumáticas: las alfombras neumáticas muestran en general algunos inconvenientes. En primer lugar, distribuyen la presión a monitorizar, interfiriendo así en los valores reales de presión. En segundo lugar, no miden fuerzas de cizalla. Y en tercer lugar, la medición es estática, es decir, se registra la presión momentánea en lugar de los cambios de presión en función del tiempo.
- Plantillas: estos sistemas se utilizan, en particular, en investigación aplicada y clínica. Generalmente su uso se restringe al laboratorio o a la consulta y no a la monitorización continuada. Normalmente, la medida se realiza durante un período de tiempo muy limitado, generando gran cantidad de datos en poco tiempo. Algunos sistemas utilizan cables, lo que limita en gran medida el área de utilización.

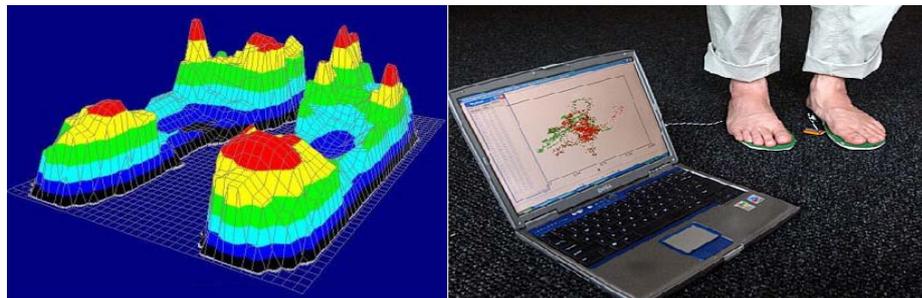


Figura 3. Sistema de medida Flexible

Algunos problemas relacionados con los métodos descritos son los siguientes:

- Son sensibles a la temperatura, es decir, la presión aumenta a medida que lo hace la temperatura, debido a que el sujeto se encuentra sobre el dispositivo (estera o sensor).
- Los dispositivos cuentan con un número limitado de sensores, por lo que puede resultar problemático el adecuado posicionamiento de los mismos debajo del área a medir.
- Las mediciones llevan su tiempo y por tanto, no siempre son útiles clínicamente o puede que se limite el número de medidas.
- Algunos dispositivos únicamente permiten llevar a cabo mediciones en condiciones estáticas.

La distribución de la presión en áreas diferentes depende en gran parte del sistema de medida utilizado. Todavía se debate cuál de los sistemas está más próximo a la distribución real de presión. Todos ellos parecen proporcionar resultados válidos de forma cualitativa. Los valores de presión absolutos deben tomarse con cautela. Los sensores resistivos tienden a mostrar unos desplazamientos y cambios relativamente altos en sensibilidad. Esto puede suponer en parte un problema que se resuelve mediante una calibración habitual de los sensores simples.

En la actualidad, la tendencia es intentar mejorar algunas características generales importantes de estos sistemas, las cuales son viables con las nuevas tecnologías de sensores disponibles:

- Que se pueda utilizar en la práctica clínica diaria con pacientes individuales
- Que las mediciones sean más rápidas y lleven menos tiempo (mediciones dinámicas: registros en tiempo y movimiento).
- Que sirvan para sustituir opiniones clínicas por un método más objetivo.

En más detalle, se deberían incorporar los siguientes requisitos en un posible sistema de medida:

- Mayor número de puntos activos
- Flexible/elástico
- Posibilitar la medición durante largos períodos de tiempo
- Medición de la humedad
- Medición de temperatura
- Portátil/ transportable
- Almacenamiento de datos suficiente

De esta manera se conseguiría por un lado el seguimiento a distancia de los pacientes, controlando en tiempo real los valores de presión y su distribución en la planta del pie, pudiendo actuar de forma inmediata en cuanto se produzca una elevación excesiva de la presión; y por otro lado la obtención de un conjunto de datos personalizados, ordenados en el espacio (asociados a puntos concretos de la planta del pie de cada paciente) y en el tiempo (asociados a los distintos momentos del día, durante el cual la intensidad y forma de la marcha del paciente varían notablemente), que proporcionan una información muy útil a la hora de diseñar plantillas y calzado especial de manera personalizada para cada paciente, y con una eficacia asegurada.

Concluyendo la podobarografía es una técnica de uso extendido en el estudio del pie. Sin embargo, todavía existen limitaciones con las técnicas disponibles. Aunque el análisis de presiones plantares ofrece una valiosa información al profesional, no menos cierto es que la mayor parte de los sistemas actuales presentan limitaciones en la durabilidad del sistema físico (fatiga de los sensores), exceso de información ofrecida y falta de información completa sobre el paciente en la vida diaria. Los trabajos más recientes utilizan la medida combinada de presiones plantares y actividad, evaluada como número de pasos reales frente al tiempo. Estos datos sugieren que la destrucción del tejido en la planta del pie, que precede a la formación de una úlcera, es el resultado de la combinación al menos del estrés repetitivo a presiones bajas y de la acción de picos de presiones localizadas. En este punto, se hace interesante trabajar en este ámbito, lo cual se lleva a cabo en este proyecto.

1.2 Objetivos del proyecto

El objetivo principal del proyecto es realizar las consideraciones necesarias en el diseño de un convertidor analógico-digital para convertir la salida de un sensor de presión/fuerza. Todas las medidas realizadas por los sensores son analógicas por naturaleza (presión). Sin embargo, para su posterior almacenamiento, transmisión y/o procesado es necesario convertir estas señales a formato digital. Para diseñar el convertidor se ha realizado un estudio sobre las distintas arquitecturas de ADCs, llegando a la elección de una de ellas para el diseño en función de varios factores, como el interés que podría producir al tratarse de una arquitectura no muy común, o a la adaptabilidad a la aplicación.

1.3 Metodología

Para abarcar este proyecto se ha pasado por diferentes etapas con el fin de alcanzar diferentes objetivos.

En primer lugar se ha planteado el problema descrito anteriormente al cual se pretende dar solución. Una vez planteado el problema se han estudiado las distintas posibilidades para

darle solución, y se ha delimitado hasta donde se pretende llegar con este proyecto, ya que abarcar la solución del problema completo resulta excesivo por tratarse este de un proyecto fin de carrera.

Una vez delimitados los objetivos del proyecto, los cuales se describen en el apartado anterior, se han estudiado los distintos parámetros de un convertidor analógico-digital a través de diversa bibliografía dedicada al efecto. Con el estudio de esta bibliografía se estará en disposición de abordar el estudio de las diversas arquitecturas existentes de convertidores atendiendo a las diferentes características de estos.

A través del estudio de los parámetros del convertidor se han adquirido los conocimientos necesarios para entender el funcionamiento y las características de las distintas arquitecturas de ADCs existentes. Se ha realizado un breve estudio de los distintos tipos de estas arquitecturas para hacer una elección adecuada acorde a las características de la aplicación teniendo en cuenta especificaciones como velocidad, consumo, etc y otros aspectos que pueden resultar interesantes mediante los cuales el diseño pueda resultar novedoso. En este estudio se ha hecho especial incidencia en los convertidores basados en tiempo, ya que a medida que se ha revisado la bibliografía, estos han resultado ser los más interesantes.

Realizado el estudio de la bibliografía, se ha optado por abordar las diversas consideraciones necesarias para el diseño de una arquitectura específica de ADC. En esta arquitectura se llevan a cabo distintas técnicas utilizadas en los ADCs estudiados y además se utiliza el tiempo como variable, es decir, se trata de una arquitectura basada en tiempo.

Seleccionada la arquitectura, se está en disposición de realizar las consideraciones necesarias para analizar la viabilidad de la arquitectura y realizar el diseño. Para abordar esto, se ha implementado un modelo de ADC en el que se trata de emular el comportamiento de la arquitectura específica mediante Matlab/Simulink. A través de este modelo se han estudiado las especificaciones más importantes de un ADC para evaluar su rendimiento incluyendo diversas no idealidades en el modelo. Para continuar con el diseño se ha realizado otro modelo incluyendo elementos reales que no se consideraban en el modelo anterior mediante el programa de diseño de circuitos integrados Cadence., en el que se han vuelto a estudiar distintas especificaciones del convertidor.

Una vez realizado el estudio de las especificaciones se estará en disposición de seguir con el diseño, incluyendo más elementos reales en el modelo implementado en Cadence, optimizando este para llegar al diseño completo, lo cual se sale de los objetivos de este proyecto y se tendrá en cuenta como ampliaciones futuras.

1.4 Descripción de capítulos

La memoria de proyecto fin de carrera aquí presentada se divide en seis capítulos, además de la presente introducción, en los que se tratan los aspectos especificados a continuación.

- Capítulo 2: Marco Teórico. En este capítulo se presenta una revisión conceptual de los aspectos más importantes relativos a las bases teóricas de la conversión analógica-digital. En primer lugar se exponen las aplicaciones y ventajas del proceso así como una descripción del convertidor analógico-digital ideal, es decir, el concepto en el que se basan este tipo de dispositivos. A continuación se introducen las distintas clases de convertidores A/D, mostrando sus características fundamentales y los campos de aplicación de los mismos. Posteriormente se presentan las especificaciones utilizadas para la caracterización de estos sistemas, divididas en dos categorías: especificaciones estáticas y especificaciones dinámicas. Por último se exponen las limitaciones de los convertidores A/D reales, es decir, cuales son los factores que provocan una desviación del comportamiento ideal del dispositivo.
- Capítulo 3: Convertidor analógico-digital basado en tiempo. En este capítulo se presenta una revisión de las diferentes arquitecturas de los convertidores basados en tiempo, es decir, del estado del arte de este tipo de convertidores. Se ha dedicado un capítulo entero para este tipo de convertidores porque el diseño que se aborda en este proyecto trata un convertidor de este tipo.

- Capítulo 4: Descripción de ADC específico. En este capítulo se va a llevar a cabo una descripción detallada del convertidor analógico-digital sobre el que se realizarán las consideraciones de diseño en este proyecto, el cual será basado en tiempo y proporcionará una alternativa muy interesante a los convertidores basados en tiempo que se describen en el capítulo 3.
- Capítulo 5: Consideraciones de Diseño de ADC basado en tiempo. En este capítulo se describirá el diseño llevado a cabo para implementar el ADC basado en tiempo en el que se basa en la arquitectura descrita en el capítulo 4. Se describirán todos los pasos llevados a cabo para realizar las distintas consideraciones de diseño mediante la implementación de modelos a través del diseño de bloques específicos para emular los distintos componentes de la arquitectura. Una vez que se describa la implementación de los modelos, se mostrará el estudio de distintas especificaciones del modelo del ADC para evaluar el rendimiento del convertidor que emula el modelo.
- Capítulo 6: Líneas futuras de trabajo. Sugerencias para el futuro diseño, teniendo en cuenta las consideraciones obtenidas para este.
- Capítulo 7: Bibliografía. En este capítulo se incluyen todas las referencias bibliográficas a las que se remite a lo largo de la memoria de este proyecto.