



## UN NUEVO MECANISMO PARA SUBIR ESCALERAS

A. González, R. Morales, A. Nieto, J. M. Chicharro, P. Pintado, V. Feliu

Departamento de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos  
E.T.S.I. Industriales de Ciudad Real, Universidad de Castilla La Mancha

(Recibido 31 de mayo de 2006, para publicación 5 de septiembre de 2006)

**Resumen** – *Este documento afronta la cuestión del diseño de dispositivos que permitan subir escaleras a una silla de ruedas. La principal característica del modelo presentado es la división del problema en otros dos, uno el remonte de un escalón, y el otro el de posicionamiento de los ejes de las ruedas dentro de la escalera. Se mostrarán los mecanismos encargados de solventarlos explicándose su funcionamiento y las pruebas que les han sido realizadas. Se mostrarán las implicaciones de esta división de tareas y su repercusión en la versatilidad y facilidad de control del prototipo.*

### 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el empleo de sillas de ruedas motorizadas aumentado en gran medida por la aparición de nuevos desarrollos y abaratamiento de los costes mejorando la calidad de vida que proporcionan a las personas con discapacidad motora [1]. Estas sillas comerciales cubren suficientemente la mayor parte de las necesidades de sus usuarios, sin embargo, a pesar de las nuevas normas de edificación promulgadas, aún encuentran bordillos, escaleras y otros obstáculos que impiden su tránsito normal en muchos espacios urbanos. Estas limitaciones imponen la investigación y desarrollo de dispositivos con capacidades motoras mejoradas con la subida de escaleras. También para usuarios con disminución de las capacidades físicas, sensoriales o cognitivas se debe trabajar en el desarrollo de dispositivos que mejoren el manejo de la silla de ruedas, estas sillas son denominadas inteligentes.

Desde su aparición las sillas de ruedas no han sufrido modificaciones significativas en su diseño básico. El primer cambio importante se produjo con la incorporación de motores para su propulsión. Un nuevo avance se está produciendo desde los años noventa con la incorporación de mecanismos para superar barreras arquitectónicas. De mediados de esa década datan los primeros modelos comerciales [2]. Estos primeros vehículos utilizaban orugas como medio de tracción e incorporaban plataformas donde transportar sillas de ruedas con sus ocupantes por las escaleras [3][4]. Como ventajas de la utilización de orugas se pueden citar su facilidad de control y su robustez que les permiten una fácil adaptación a escaleras no rectas (de caracol) o a terrenos irregulares. Entre sus inconvenientes pueden citarse los siguientes: su bajo rendimiento en rodadura, su falta de seguridad por apoyarse únicamente en el borde de los escalones y la dificultad en las operaciones de entrada y salida de la escalera. Pero el principal problema de la oruga es su incomodidad, ya que carecen del sistema de amortiguación que el neumático proporciona a una silla de ruedas convencional. Una evolución de estos modelos surgió con la utilización de ruedas de baja presión o una combinación de éstas junto con orugas. Con ellas se mejora el comportamiento tanto en rodadura como en escaleras pero manteniendo en parte las limitaciones en cuanto a bajo rendimiento común a estos sistemas [5][6].

Los trenes de ruedas giratorios es otra de las disposiciones ampliamente empleadas, entre sus ventajas puede remarcarse el buen rendimiento en rodadura. Se puede utilizar un único tren de ruedas, en cuyo caso será necesario un sofisticado sistema de control [8], o bien la asistencia por parte de otra persona. Con más ejes [7] se aumenta la seguridad, autonomía y complejidad. El principal inconveniente, común a ambas tipologías, es la mala adaptación a escaleras muy diferentes a las de diseño. Esto es debido a que la geometría del cluster es fija mientras que los escalones que puede encontrarse un usuario de sillas de ruedas pueden ser muy variables en sus valores de huellas y contrahuellas.

Otras soluciones empleadas para solucionar el problema es el empleo de sillas de ruedas con patas [9] [10]. Éstas por sí solas no son una solución válida por su bajo rendimiento en la locomoción horizontal. Las ventajas aparecen si se incorporan ruedas ya que poseen un elevado rendimiento en rodadura unido a la versatilidad que proporcionan las patas a la hora de superar escalones [11][12]. En la literatura especializada se han presentado sistemas que unen patas y trenes giratorios para evitar sus inconvenientes así como para solventar el problema de los grandes escalones [13]. El inconveniente de estos últimos sistemas es el elevado número de grados de libertad que es necesario motorizar para mantener la rigidez de la estructura con la consiguiente repercusión negativa en complejidad, peso, precio y autonomía.

En este artículo se presenta una nueva concepción en cuanto al diseño de los mecanismos necesarios para superar barreras arquitectónicas. El más complicado de los obstáculos que puede encontrar un usuario de silla de ruedas es la escalera. Para su superación se ha procedido a dividir este problema en otros dos. El remonte de un peldaño y el posicionamiento de los ejes dentro de la escalera. Esta solución simplifica el diseño del mecanismo específico del problema y permite que su control sea más sencillo. Estas dos características aumentan la flexibilidad del conjunto en cuanto a las configuraciones de escaleras que es capaz de superar con seguridad.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO. UNA NUEVA CONCEPCIÓN DE DISEÑO

En la figura 1 se muestra un modelo CAD generado mediante Solid Works del modelo presentado y en la figura 2 la realización física del mismo. Las dimensiones del conjunto pueden apreciarse en la figura 3 quedando todas ellas dentro de lo que estipula la norma ISO 7193:85. Para conseguir el objetivo de cumplir esta norma para sillas standard con una silla adaptada a subir escaleras se ha realizado un gran esfuerzo de compactación de todos los elementos. Especial mención debe hacerse del hecho de conseguir colocar la cota de altura de la banqueta del asiento por debajo del medio metro. En lo referente a las baterías, éstas han sido colocadas a ambos lados de los actuadores y ligeramente retrasadas para conseguir un más equilibrado reparto de pesos, como puede apreciarse en la figura 3.

En la introducción se hacía un repaso a distintos prototipos existentes. Los más graves inconvenientes que presentan son los derivados de la complejidad del control necesario para la sincronización de todos los actuadores y el de falta de flexibilidad a la hora de superar obstáculos muy diferentes del de diseño. Los autores de este artículo piensan que estos inconvenientes son consecuencia de un inadecuado planteamiento del problema. Desde nuestro punto de vista, el diseño se simplifica cuando se consideran los siguientes dos problemas por separado:

- Remonte de un peldaño de altura indeterminada.
- Posicionamiento de los ejes de las ruedas dentro de una escalera donde la diferencia de cotas es del orden de la batalla.

Cada uno de estos problemas requiere soluciones diferentes e independientes. Con esta división es más fácil encontrar un diseño adecuado a cada cuestión. En la figura 4 se muestra el esquema cinemático de ambas soluciones. Una vez resueltos los subproblemas, los mecanismos solución generados se implementarán para conformar el sistema completo. El marcado como (1) respondería al remonte del escalón y el que tiene el número (2) se encargaría del posicionamiento de los ejes. Los problemas así planteados son independientes de forma que si el problema fuera el de la superación de un escalón aislado el mecanismo (1) seguiría siendo solución válida sin necesidad de añadir el (2) y viceversa. Las mejoras, modificaciones e incluso la fabricación pueden hacerse por separado con la flexibilidad que eso proporciona.

Para el control del sistema se ha mantenido la misma concepción utilizada para diseñar el sistema mecánico. De este modo cada mecanismo atiende básicamente a sus sensores y señales de comando para realizar su tarea, y con relativa independencia de la actuación de los otros sistemas lo que lo hace más eficaz y sencillo. Esto no ha evitado calcular la cinemática del sistema completo [18] [20] necesaria para diseñar el sistema de control de la silla de ruedas.

En lo referente a la nomenclatura de los distintos elementos, en lo sucesivo se denominará mecanismo de remonte al diseño realizado para solventar el primero de los problemas anteriores y mecanismo de posicionamiento al segundo. Respecto de los trenes de ruedas de la silla y a los actuadores correspondientes

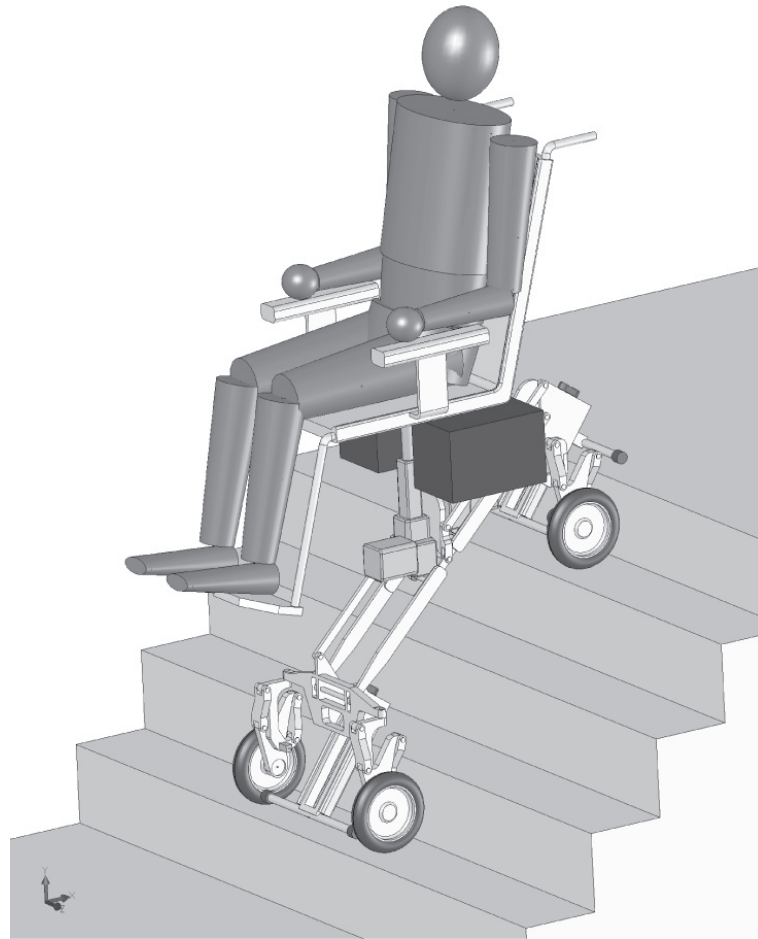


Fig. 1. Modelo de la silla negociando una escalera.

se denominará nº1 al primero que encuentra un escalón en el proceso de bajada, marcado como (2.6) en la figura 4, siendo el nº2 el otro (2.3), que en esta realización es el que recibe la motricidad para la rodadura convencional del vehículo.

En cuanto al direccionamiento del prototipo, es completamente análogo a otras sillas de ruedas auto-propulsadas, con motores independientes en cada rueda del tren motriz. Si se añaden ruedas castor para disminuir el radio de giro mínimo habrá que considerar el hecho de que deben poder bloquearse en posición paralela al tren motriz antes de negociar la escalera.

Algunos autores dan gran importancia al problema de remontar grandes escalones [13]. El modelo aquí presentado puede remontar escalones de 215mm de altura. Esta altura viene restringida por la longitud máxima que puede desplegarse el apoyo deslizante, en este caso 300mm. Si se colocan guías que permitan mayor despliegue se puede elevar el escalón máximo con la única restricción de que no interfieran con otros elementos del sistema. El precio a pagar sería una menor compacidad del diseño resultante.

Otro aspecto importante es la orientación del usuario respecto de la escalera cuando sube o baja escaleras. Respecto a este particular, los autores piensan que en el proceso de bajada el usuario debe de mirar en dirección a la marcha. Como consecuencia la subida se produciría de espaldas. Esto puede resultar incómodo o poco tranquilizador para el usuario pero ofrece un bajo centro de gravedad del conjunto. La subida con

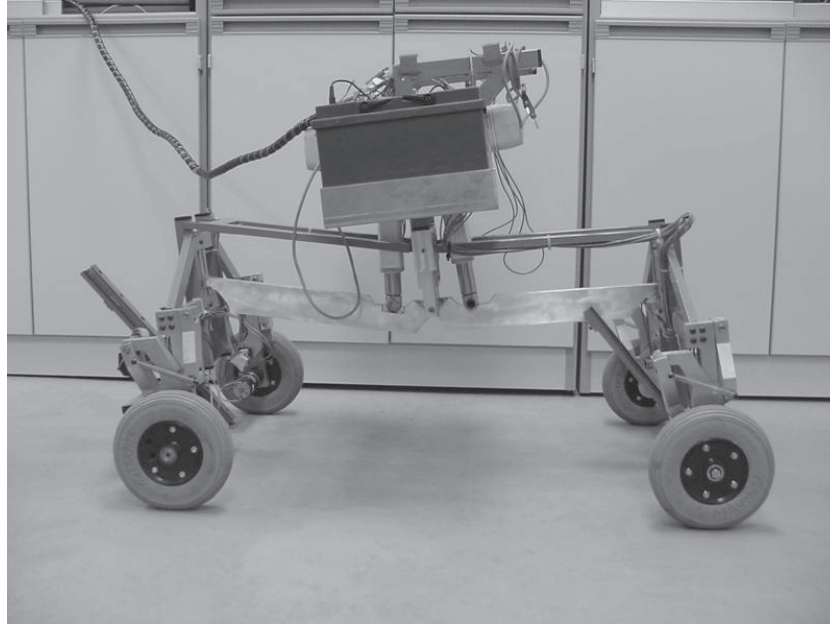


Fig. 2. Realización del mecanismo global sin la banqueta.

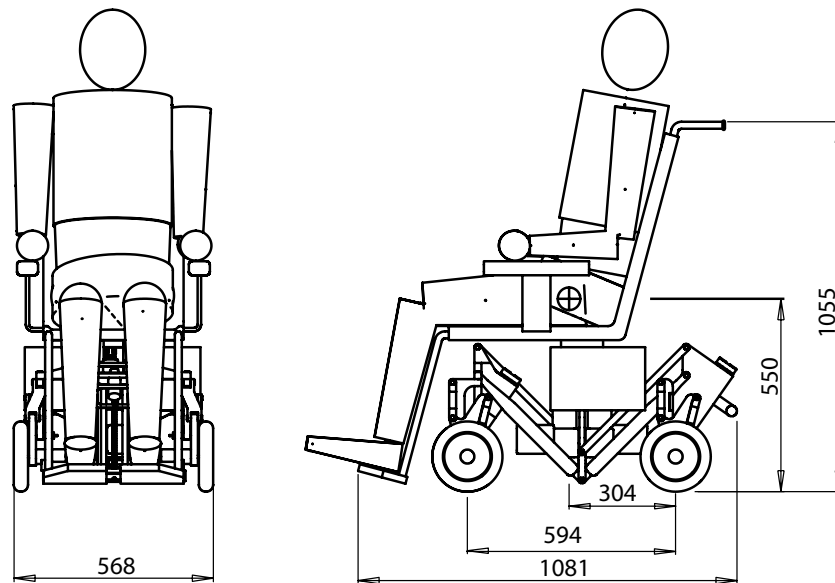


Fig. 3. Dimensiones del conjunto y posición del centro de gravedad.

el paciente mirando escaleras arriba tiene el inconveniente de un centro de gravedad del conjunto excesivamente alto. Una solución interesante sería la de girar  $90^\circ$  la banqueta para que el paciente subiera de lado, lo que permite vigilar los apoyos y no perjudicar la estabilidad.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL MECANISMO DE REMONTE DE PELDAÑO

Este mecanismo es el encargado de conseguir que la rueda donde está instalado supere el escalón. Atendiendo a la división del problema, puesto que cada rueda deberá salvar la discontinuidad, el mecanismo

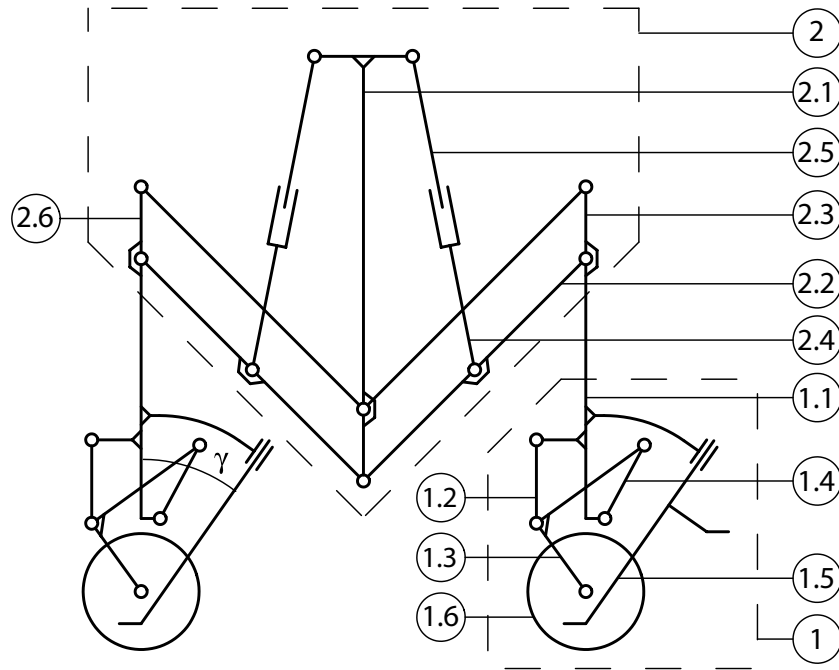


Fig. 4. Esquema cinemático del mecanismo de de remonte de peldaño (1) y de posicionamiento de ejes (2).

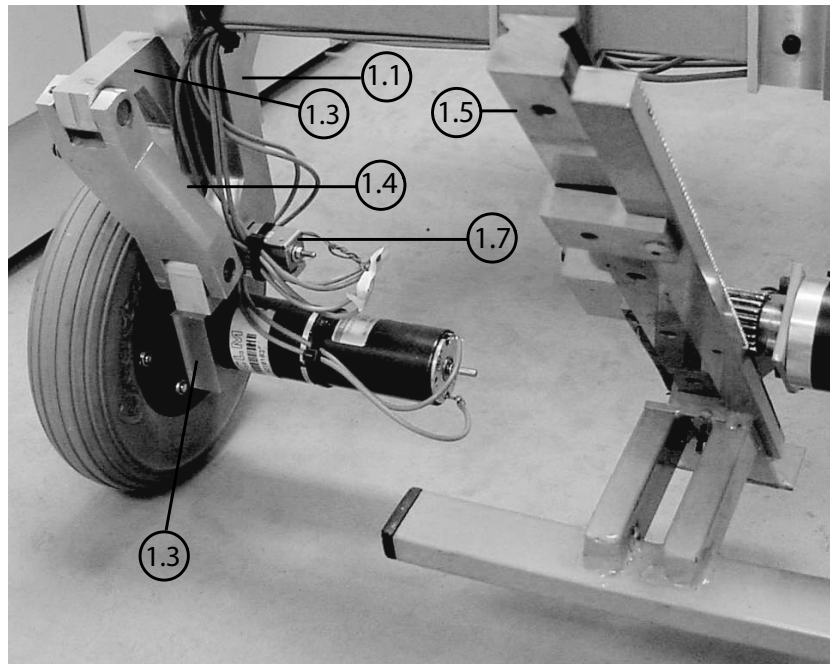


Fig. 5. Mecanismo de remonte de peldaño.

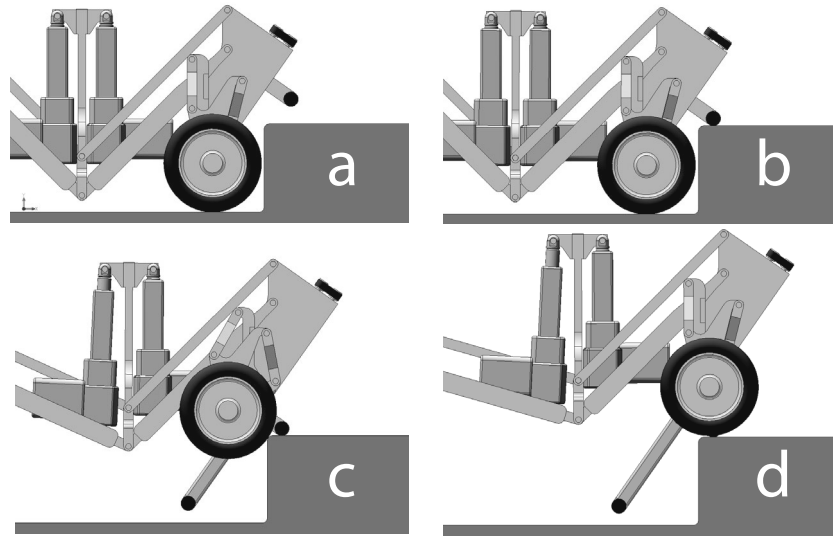


Fig. 6. Secuencia de subida de un peldaño.

diseñado deberá ser incorporado a cada una de ellas independientemente. En la figura 4 puede apreciarse su esquema cinemático y sus componentes etiquetados como (1.X) y en la figura 5 se muestra una realización física del mismo. En ambas figuras se utiliza el mismo número para marcar las mismas barras. Su componente principal es un apoyo deslizante (marcado como (1.5) en la figura 4) unido mediante un par prismático motorizado a la estructura de la silla. Este par prismático formará un ángulo fijo  $\gamma$  con la estructura, tal como se muestra en la figura 4. El apoyo deslizante es el medio con el que la silla supera la contrahuella del escalón. Como elemento motriz del apoyo deslizante se ha instalado un sistema piñón-cremallera. El inconveniente de la interferencia de la rueda con la esquina del peldaño se solventa mediante un mecanismo de cuatro barras (1.1, 1.2, 1.3, 1.4 en la figura 4). En él la barra fija (1.1) estaría unida rígidamente a la pata de la silla y el buje de la rueda formaría parte del acoplador (1.3). Para su síntesis se ha obligado a que la dirección de la trayectoria del centro de la rueda sea ligeramente ascendente y rectilínea respecto de la barra fija. La razón de la elección de esta trayectoria está relacionada con el proceso de bajada del escalón que se explicará más adelante. Este mecanismo puede bloquearse en la posición de rodadura convencional mediante un pestillo electromagnético (1.7). El sistema se completa mediante un muelle para recuperar la posición inicial.

La posición de los tacos de goma con los que el apoyo deslizante contacta con la escalera se realizó atendiendo al desplazamiento máximo del apoyo deslizante. En esta realización se eligieron unas guías telescópicas con un recorrido de 300mm. En su posición recogida, el apoyo del tren nº 1 se sitúa a 30mm del suelo y puesto que se ha escogido  $\gamma = 55^\circ$ , el escalón máximo a superar es de  $300\sin(55) - 30 = 215\text{mm}$  de contrahuella. Obviamente, para el apoyo trasero se utilizó el mismo escalón máximo. Esto definió la ubicación del segundo taco de goma del apoyo deslizante del tren nº 2 situado a 215mm del suelo. Este taco contactará en el escalón a subir y ha sido añadido para aumentar la distancia entre apoyos y así aumentar la estabilidad en la escalera.

En la figura 6 se muestran cuatro instantes en el proceso de remonte de un escalón. Comienza cuando la silla se acerca al máximo a la contrahuella del escalón. En este instante el pestillo electromagnético bloquea el mecanismo de cuatro barras. Este momento se representa en el fotograma (a). Acto seguido se despliega el apoyo hasta que contacta con la huella del escalón y momento en el que se desbloquea el mecanismo de cuatro barras (b). Se sigue desplegando el apoyo lo que provoca que el chasis de la silla progrese hacia arriba en la dirección del par prismático del apoyo deslizante. La rueda, que sin el mecanismo de cuatro barras interferiría con el escalón, se desplaza hacia atrás para salvarlo (c). Una vez superado, la rueda puede

volver a su posición de partida impulsada por un muelle recuperador. Esta vuelta a la posición inicial de la rueda es detectada y genera la señal para parar el despliegue del apoyo. En este instante se vuelve a bloquear el mecanismo de cuatro barras con el pestillo electromagnético y se acciona el motor de la guía (d). El peso vuelve a trasladarse del apoyo deslizante a la rueda. Como último se acciona el motor para colocar el apoyo en su posición inicial para así dejar el sistema preparado para remontar el siguiente escalón.

El proceso de bajada es esencialmente igual al de subida pero con la secuencia de acontecimientos invertida. Esto es así porque el sentido del movimiento del vehículo de subida es el inverso del de bajada y porque el movimiento se hace a baja velocidad y aceleración lo que hace despreciables las fuerzas de inercia. En un primer momento el tren de ruedas se acerca a baja velocidad a la escalera, lo suficiente para que el apoyo baje adelantado respecto al borde del escalón, deteniéndose cuando el taco de goma en el que se apoyará se quede a pocos milímetros del siguiente peldaño. Después de esto se completa el acercamiento hasta el borde. Esta operación se recomienda realizarla así por seguridad, ya que si el usuario se excediese en el avance no significaría peligro de vuelco ya que el peso pasaría de igual forma al apoyo deslizante si bien éste se realiza con la pequeña caída correspondiente a la longitud a la que quedó el apoyo del peldaño siguiente. En este momento se libera el movimiento del mecanismo de cuatro barras y se cambia el sentido del movimiento del motor piñón-cremallera. En este instante es cuando toma relevancia la dirección de la trayectoria del centro de la rueda respecto a la barra fija. Si es ascendente, cuando el peso pasa del apoyo a la rueda, la reacción del suelo hará desplazarse a la rueda hacia afuera para así salvar el escalón. En este proceso cuando la rueda haya vuelto a la posición normal de rodadura volverá a ser bloqueada con el pestillo. Por último, el apoyo sigue recogiendo hasta que la reacción del suelo vuelva a pasar del apoyo deslizante a la rueda.

#### 4. DESCRIPCIÓN DEL MECANISMO DE POSICIONAMIENTO DE EJES

El mecanismo anteriormente descrito se instala en cada uno de las ruedas tanto del tren nº1 como nº2, y para su funcionamiento se asume que estos trenes permanecen perpendiculares al suelo. A su vez el usuario también debe poder superar los obstáculos sin vaivenes o inclinaciones. Pero si se suben varios escalones la inclinación respecto de la gravedad sería excesiva, e incluso para diferencias de altura entre ejes del orden de la batalla puede comprometer la estabilidad del conjunto debido al generalmente alto centro de gravedad de las sillas de ruedas. Para restituir la verticalidad se necesita un nuevo mecanismo. La idea principal de su diseño consiste en la división del chasis de la silla en tres partes con movimiento relativo, representados en esquema la figura 4 y en una realización física en la figura 2. El más voluminoso, el central, recibe el asiento y las baterías (Marcado como (2.1) en la figura 4), un segundo chasis que alberga el tren nº1 (2.6) y un tercero el nº2 casi idéntico al anterior (2.3), ambos incluyen el par de ruedas que forman parte del mecanismo de remonte explicado anteriormente. La tracción puede recaer en uno o en los dos trenes de ruedas. Estas tres partes están unidas mediante mecanismos de cuatro barras con las longitudes iguales dos a dos lo que obliga a que no se produzca giro relativo entre ellos pero permitiendo que la distancia entre ejes varíe al igual que la altura relativa de un tren respecto a otro. El sistema así constituido tiene un número de grados de libertad igual a dos, más que suficientes para adaptarnos a cualquier tipología de escaleras, permitiendo además generar cualquier trayectoria de la silla.

Para el accionamiento del mecanismo de posicionamiento se ha recurrido a actuadores lineales comerciales [17]. La exigencia de compacidad del diseño, ha llevado a utilizar un actuador con una carrera corta de tan solo 100mm. Pero para poder afrontar pendientes de 45° las barras sufren giros de 90 grados lo que implica un elevado esfuerzo en el actuador dada su corta carrera. En el prototipo realizado se optó por el modelo de SKF MAX3 de 100mm de carrera y 8000N de carga máxima.

Atendiendo a la división de tareas que constituye el principal argumento de este artículo, las principales operaciones básicas que es capaz de realizar este mecanismo (independientemente de que aparezcan o no discontinuidades que solventará el otro mecanismo) son las siguientes:

1. Corrección de la inclinación del usuario cuando este se encuentra en una pendiente. Esto se realiza con el actuador nº2 desplegándose lo necesario para impedir la inclinación de la silla. La variable de entrada para el control será la medición mediante un inclinómetro de la variación del ángulo del

chasis central respecto de la gravedad. La pendiente máxima a la que puede adaptarse el prototipo realizado es de  $45^\circ$ .

2. Variación de la altura de la banqueta. Esta operación se realiza desplegando o plegando al unísono ambos actuadores. Con este movimiento se modifica el ángulo de las barras de enlace entre plataformas con la consiguiente variación en la distancia entre las ruedas, es decir variando la batalla. Respecto al control de la operación, si se quieren evitar problemas de sincronización, puede operarse desplegando el actuador nº1 y teniendo activada simultáneamente la operación de corrección de inclinación.

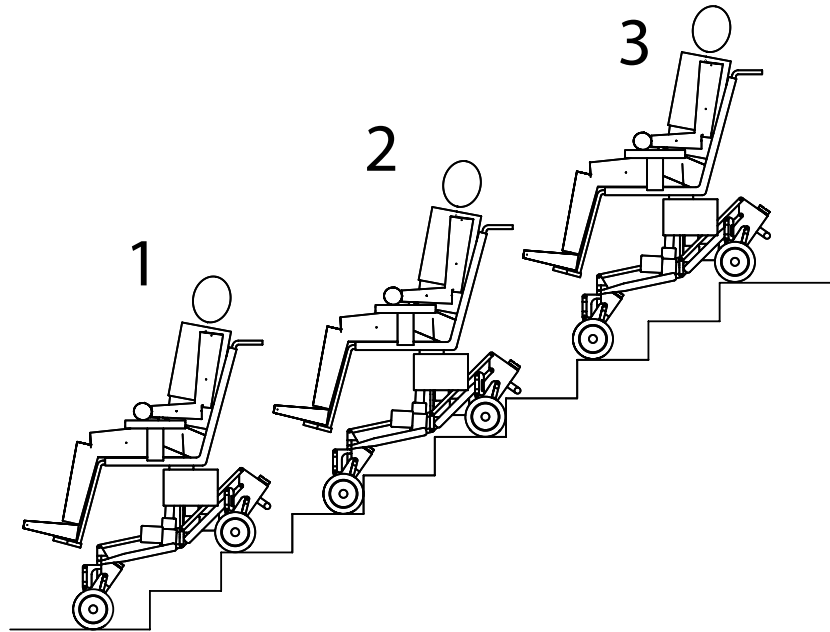


Fig. 7. Fases en el proceso de subida de una escalera.

En cuanto al funcionamiento del mecanismo de posicionamiento, cuando el usuario sube o baja una escalera podemos dividir el proceso en tres fases que pueden observarse en la figura 7:

- Una primera fase de entrada en la que un eje negocia los primeros escalones y el otro permanece en el plano. Antes de empezar a subir se efectúa una ligera elevación de la silla (operación 2) que produce un aumento de la batalla que aumentará la seguridad. Después el tren nº2 va remontando y mediante la operación 1 de corrección de inclinación se mantiene la inclinación de la silla acotada en los valores que el control permita.
- Una fase intermedia en la que ambos trenes ya están negociando escalones. En esta fase la repetitividad en las dimensiones de huella y contrahuella que suelen presentar las escaleras puede utilizarse para simplificar el control y mejorar la comodidad y la seguridad. Para ello, mediante la operación 2 podemos variar la batalla de manera que ésta sea un múltiplo de la huella del escalón y así realizar el proceso de remonte de escalón de forma simultánea en ambos trenes.
- La fase final es en la que se produce la salida, en ella el tren nº2 está en una superficie plana y el nº1 sigue remontando escalones. Cuando ha terminado, si la situación del mecanismo no es la de máxima compacidad (menor altura y batalla), con la operación 2 se puede llevar la silla a ese estado.



## 5. ENSAYOS REALIZADOS

Se han realizado diversas pruebas para corroborar el buen funcionamiento de la silla. Se han realizado simulaciones por ordenador para determinar la estabilidad del sistema en el interior de una escalera. Para ello se ha calculado la posición del centro de gravedad en la situación más desfavorable. En las figuras 3, 8 y 9 puede apreciarse el resultado de los cálculos. La escalera utilizada ha sido la más desfavorable permitida por la norma DIN 18065. También era necesario contar con un modelo humano. Para ello se ha construido un androide siguiendo el modelo de Hanavan-Kwon [19] [21]. Este androide se construye mediante elementos geométricos sencillos cuyas dimensiones son obtenidas a partir de distintas medidas antropométricas de una persona. En concreto se ha usado un varón de 25 años de edad y 83.2 kg de masa. La posición del centro de masa del conjunto usuario más silla, en la escalera más desfavorable que permite la norma DIN 18065, se representa en la figura 8. Incluso aún cuando el paciente se mueva la estabilidad del conjunto está garantizada como se muestra en la figura 9.

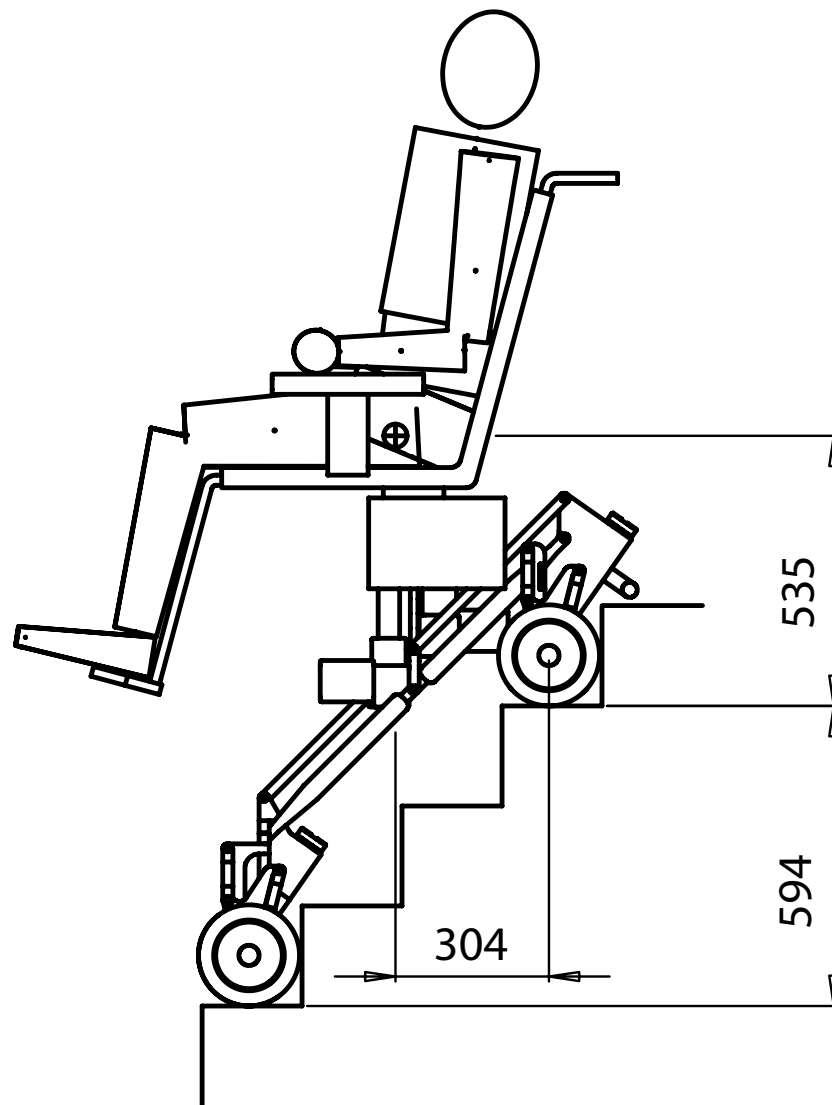


Fig. 8. Centro de masa del conjunto en una escalera.

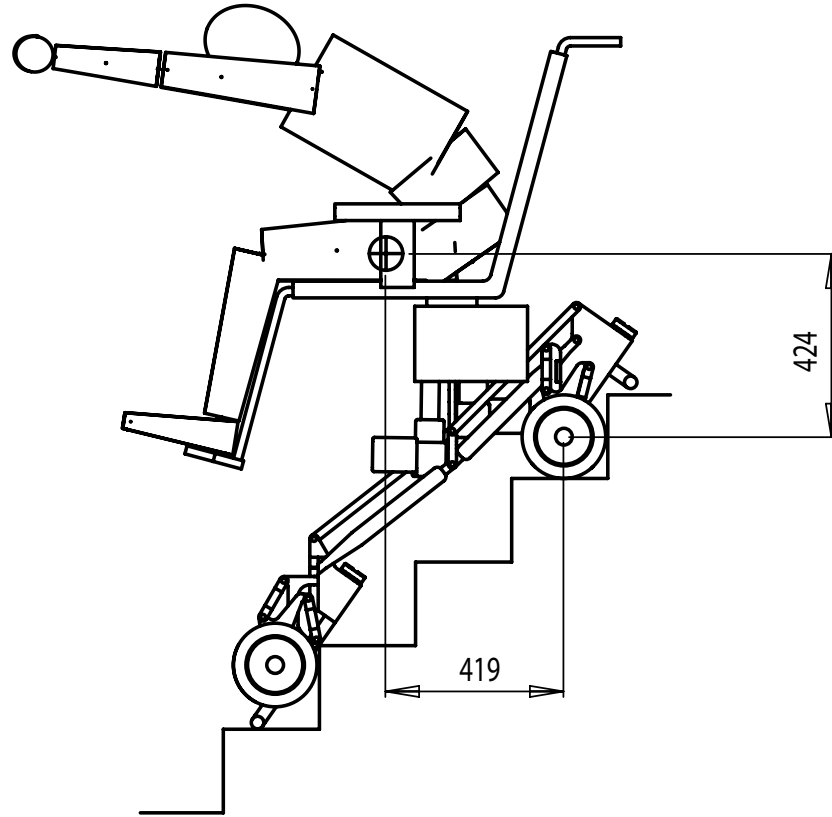


Fig. 9. Centro de masa del conjunto en una escalera con dummy flexionado.

Una vez que se ha verificado el funcionamiento del sistema en los análisis computacionales se puede pasar a los ensayos sobre el prototipo real. Se han realizado dos tipos de pruebas: la primera de ellas consiste en el remonte de un único escalón, la segunda de ellas ha supuesto la subida de una escalera completa.

Se ha utilizado un equipo de captura de movimiento sin contacto para registrar la evolución del sistema. El sistema de captura dispone de tres cámaras que emiten rayos infrarrojos. La emisión vuelve a ser captada, tras ser reflejada por unos marcadores esféricos situados en los puntos donde se desea estudiar el movimiento. La posición bidimensional de los marcadores recogida por cada cámara es enviada a un ordenador donde se encuentra instalado el software que analiza los datos. Con la información de las tres cámaras, el programa es capaz de obtener las coordenadas X, Y, y Z de cada marcador en todo instante.

La información obtenida del programa de análisis permite reconstruir las trayectorias de los puntos de interés del mecanismo y, de este modo, visualizar el movimiento real del sistema. En la figura 10 se muestra el dispositivo experimental utilizado para la captura de las trayectorias. En ella aparecen el sistema, las tres cámaras de infrarrojos y el escalón a superar.

### 5.1. Subida de un escalón

Con el ensayo de subida de un escalón se demuestra la capacidad del sistema de remonte para superar cualquier escalón con altura inferior a 200 mm. Para ello se ha construido un peldaño con patas intercambiables de manera que su contrahuella puede tomar los valores de 160, 180 y 200 mm. Para superarlos el sistema no necesita tener previamente ninguna información respecto de la geometría del escalón, siendo capaz de realizar la subida sin ninguna modificación previa y sólo con la dotación sensorial explicada en el capítulo 4. Para este experimento se han utilizado tres marcadores cuya posición se muestra en la figura 11. Los marcadores etiquetados como 1 y 2 se encuentran en el chasis del tren. El número tres se encuentra en el centro de la rueda. La figura 11 muestra las posiciones de los tres marcadores así como su situación en el



Fig. 10. Dispositivo experimental para la captura de trayectorias.

prototipo. En la gráfica puede observarse cómo la barra chasis del mecanismo de remonte supera el escalón con caminos de inclinación constante e independiente de la altura del escalón.

## 5.2. Subida de una escalera completa

La prueba definitiva de funcionamiento del prototipo consiste en la superación de una escalera completa. Para la realización del ensayo se ha construido una escalera de tres escalones con la máxima contrahuella y la mínima huella permitidas por la norma DIN 18065. Pese a su pequeño tamaño, esta escalera permite estudiar el comportamiento del sistema en las tres fases de la subida comentadas anteriormente (fase de entrada, subida simultánea y fase de salida).

Para el experimento se han dispuesto 5 marcadores: tres en el tren número 1 y otros dos en el tren número 2. Los dos marcadores instalados en la barra chasis del tren número 1 permiten obtener tanto el camino del tren 1 como la inclinación de las tres plataformas del sistema. El tercer marcador de este tren muestra la trayectoria que sigue el centro de la rueda. Los dos marcadores del tren 2 están colocados de manera que proporcionan el camino del tren 1 y la trayectoria de la rueda del tren 2. En este experimento únicamente se han programado trayectorias paralelas al camino bajo el tren número 2, por lo que el actuador 1 ha permanecido inactivo. De este modo, no es necesario colocar marcadores en la plataforma central, ya que ésta se moverá solidaria al tren número 2. En la Figura 11 se puede apreciar la situación de estos marcadores.

En la figura 12 se muestran las trayectorias obtenidas en el ensayo. Las líneas etiquetadas como 3 y 5 representan las trayectorias de los centros de las ruedas de los trenes 1 y 2 respectivamente. Las líneas etiquetadas como 1, 2 y 4 muestran los caminos para los trenes 1 y 2. No se han colocado los marcadores 2 y 4 en los mismos puntos de sus respectivas barras chasis de los mecanismos de remonte para hacer más clara la figura. No obstante se puede apreciar cómo los caminos para ambos trenes son prácticamente iguales. En este ensayo se ha programado una histéresis algo más elevada en el control de horizontalidad que realiza el mecanismo de posicionamiento, razón por la que el *rizado* de las trayectorias es de mayor amplitud y menor frecuencia. En esta gráfica también puede apreciarse que en uno de los segmentos de las trayectorias de los marcadores 1, 2 y 4 dicho rizado desaparece. Este hecho se debe a que durante esos instantes el sistema se

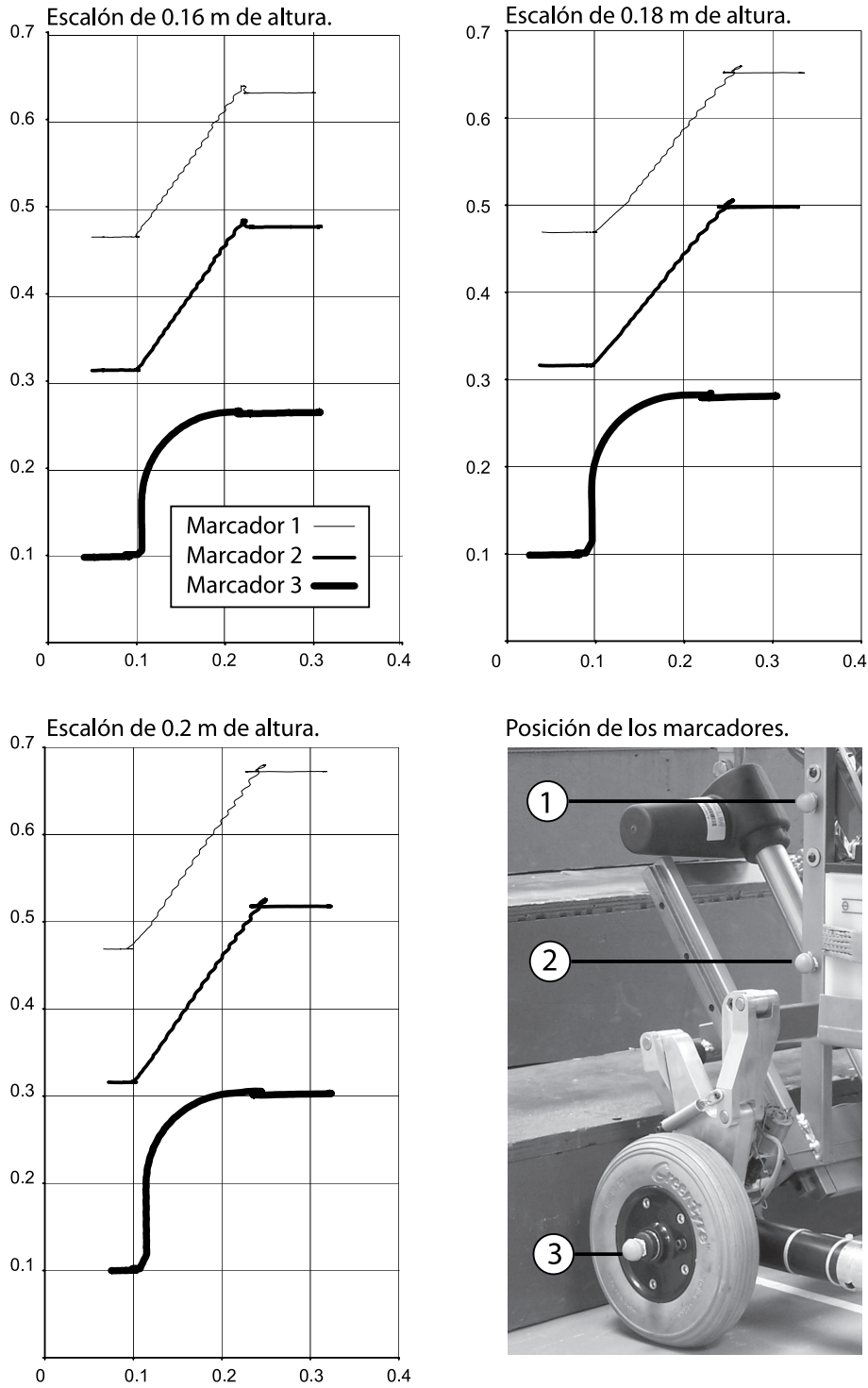


Fig. 11. Trayectorias de los marcadores en la subida de diferentes escalones.

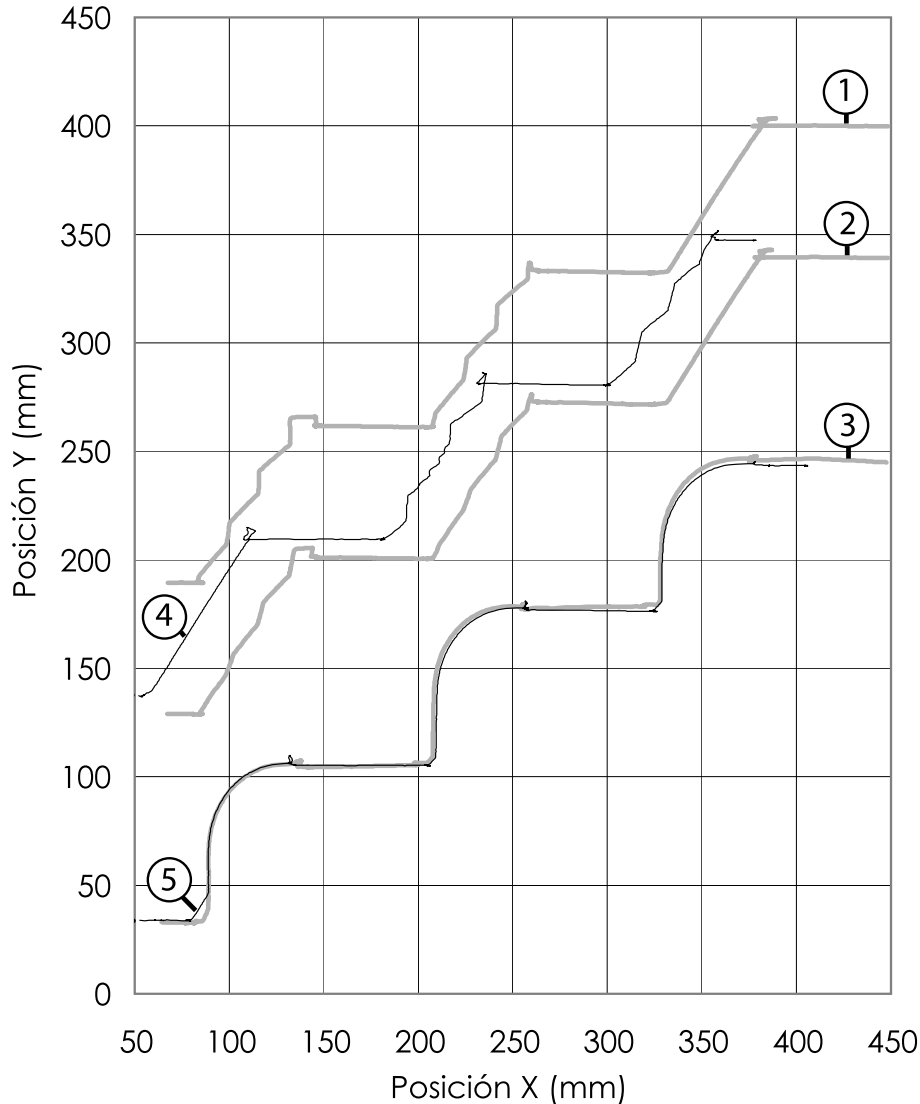


Fig. 12. Trayectorias y caminos de los marcadores en la subida de una escalera completa de tres escalones.

encuentra en la segunda de las tres fases del proceso de subida. Los actuadores permanecen inactivos en esta fase, por lo tanto, la trayectoria generada es perfectamente recta y de igual pendiente que la de los apoyos deslizantes.

## 6. CONCLUSIONES

La principal característica del diseño del modelo es la división del problemas de subir escaleras en otros dos y por consiguiente la utilización de sistemas diferenciados para solventarlos. Este nuevo enfoque tiene las siguientes ventajas:

- Gran modularidad en su diseño que es debido a su concepción que lleva a implementar mecanismos y sistemas de control diferenciados. Esta modularidad repercute muy positivamente en su economía de fabricación y sencillez de control.
- Elevada seguridad de funcionamiento. Característica siempre importante y más tratándose de asistencia a personas con discapacidad. Se consigue conduciendo al mecanismo por situación de

equilibrio estable en todo momento sin necesitar de una habilidad especial en su manejo ni de asistentes o elementos externos tales como pasamanos para su uso seguro. Esto se ha conseguido con el mecanismo de remonte que gracias a su especialización que permite ser diseñado con mejores prestaciones.

- Otra característica importante es la versatilidad en la geometría de escaleras que es capaz de afrontar con éxito. Debido también a haber independizado el remonte del escalón del resto de los mecanismos. Esto incluye cualquier escalera contemplada en las normas de edificación DIN 18 065.
- Diseño compacto y poco aparatoso que cumple la normativa existente relativa a sillas de ruedas, especialmente en lo referente a sus dimensiones máximas [15] [16]. Además con su discreto aspecto se consigue una mejor aceptación pública y se evitan incomodidades.

En este documento se ha tratado el problema de las escaleras rectas. Para poder negociar escaleras con bordes de escalones no paralelos, como por ejemplo una escalera de caracol, se necesitaría como primera medida desdoblarse el mecanismo de posicionamiento en uno izquierdo y otro derecho. Este hecho no invalida la filosofía expuesta en el documento acerca de la división de los problemas y los mecanismos que los solucionan, sino que más bien la refuerza. Este nuevo análisis se plantea como desarrollo para futuros prototipos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Hotchkiss. "Independence Through Mobility". Washington, DC: Appropriate Technology International 1985.
- [2] Stairclimber of The Wheel Chair Lift Company [www.thewheelchairlift.co.uk](http://www.thewheelchairlift.co.uk)
- [3] R. Misawa "Stair-climbing vehicle for wheelchair", Japan Patent 8-286 753, Oct. 29, 1996.
- [4] "Stair-climbing vehicle for wheelchair", U. S. Patent 6 158 386, Dec. 12, 2000.
- [5] Y. Uchida, K. Furuichi, S. Hirose. "Fundamental Performance of 6 Wheeled off-road Vehicule Helios-V". Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detroit, Michigan. May 1999.
- [6] S. Hirose, E. F. Fukushima, R. Damoto, H. Nakamoto. "Design of Terrain Adaptative Versatile Crawler Vehicule Helios-VI". Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Maui, Hawaii, USA,
- [7] Prototype of of Tamagawa University School of Engineering. [www.tamagawa.jp](http://www.tamagawa.jp).
- [8] Ibot tm 3000 is a product of Independence Technology a Johnson and Johnson Company. [www.indetech.com](http://www.indetech.com).
- [9] V. Krovi, P. Wellman, V. Kumar, W. Harwin. "Design of a Walking Wheelchair for the Motor Disabled" Proceedings of the 4th International Conference on Rehabilitation Robots", Willmington, DE, 1994.
- [10] G. Wiesspeiner, E. Windischbacher. "Distributed Intelligence to Control a Stair-Climbing Wheelchair". 1995 IEEE-EMBC and CMBEC. Theme 5: Neuromuscular Systems/Biomechanics.
- [11] M. Lawn, T. Takeda " Design of a robotic-hybrid wheelchair for operation in barrier present enviroment". Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society", Vol 20, No5, 1998.
- [12] C. Grand, F. Benamar, F. Plumet, P. Bidaud. "Stability and traction Optimized of a Reconfigurable Wheel-Legged Robot". The international Journal of Robotics Research. Vol. 23, No 10-11, October-November 2004, pp. 1041-1058.
- [13] M. J. Lawn, T. Ishimatzu. "Modeling of a Stair-Climbing Wheelchair Mechanism with High Single-Step Capability". IEEE Transaction on Neural Systems and Rehabilitation Research, Vol. 11, NO. 3, September 2003.

- [14] K. Nagai, I. Nakanishi, H. Hanafusa, Y. Takahashi, H. Bunki. "Consideration on Independent Transfer Using An Assistive Device with Functions of Power Assistance and Motion Guidance". Proceedings of the 6/th Conference of the Association for the Advancement of Assistive Technology in Europe (AAATE). Dublin 2003.
- [15] "ISO internacional Standars for Wheelchairs, ISO/FDIS 7176-8", Copyright ISO 1997.
- [16] "UNE Sillas de Ruedas, Dimensiones Totales Maximas, UNE 111-915-91". AENOR, 1991.
- [17] "SKF Actuator Range 2004". Publication No. 5322E. 0311B Halls Offset AB. [www.magnetic.skf.com](http://www.magnetic.skf.com)
- [18] R. Morales, A. Gonzalez, V. Feliu, P. Pintado. "Kinematics of a New Staircase Climbing Wheelchair". Proceedings of the 7th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR)". September 22-24, 2004. Madrid, Spain.
- [19] Hanavan EP, "A mathematical model of the human body", Wright-Patterson Air Force Base, OH, AMRL-TR-64-102, (1964).
- [20] R. Morales, V. Feliu, A. González, P. Pintado. *Coordinated Motion of a New Staircase Climbing Wheelchair with Increased Passenger Comfort*. 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'06. May 15-19 2006 Orlando, USA.
- [21] Kwon, Y.H, "Experimental Simulation of an Airborne Movement: Applicability of the Body Segment Parameter Estimation Methods", *Journal of Applied Biomechanics* 17,(3), pp 232-240 (2001)