



PROPUESTA DE  
DISEÑO MECÁNICO Y  
ANÁLISIS DEL  
PROCESO PRODUCTIVO  
DE SILLAS DE RUEDAS  
BAJO UN ENFOQUE  
QUE INTEGRE LA  
INGENIERÍA DE DISEÑO  
Y LA INGENIERÍA DE  
MANUFACTURA

La motivación del presente trabajo, es el desarrollo del concepto de una silla de ruedas y el estudio de las diferentes alternativas de manufactura bajo el enfoque de una filosofía que integre la Ingeniería de Diseño y la Ingeniería de Manufactura.

### **1.1 Definición del producto**

Se define *silla de ruedas* al mecanismo que le permite a una persona discapacitada, ya sea de manera temporal o permanente, poder desplazarse de un lugar a otro.

Una silla de ruedas debe tener como objetivo permitir al usuario la máxima funcionalidad, comodidad y movilidad. Para cumplir con este objetivo, la silla debe estar pensada para ajustarse a la persona, no es la persona la que debe amoldarse a su silla.

Las sillas *de* ruedas se utilizan cuando hay presencia de problemas neuromusculares, lesiones que pueden ser producto de accidentes de tránsito, caídas, enfermedades por accidentes cerebrovasculares, entre otras, que ocasionan una limitación parcial o total de los movimientos corporales.

Al momento de prescribir una silla de ruedas es necesario identificar la patología o el tipo de lesión que presenta el paciente, y conocer los componentes que mejor se adapten al usuario, con el fin de optimizar su calidad de vida.

■ Janeth P. Herrera  
■ Rubén A. Figueroa

TUTORES ACADÉMICOS:  
Henry Gasparin  
César Pérez

### 1.1.1 Selección de la patología del paciente

En el ser humano, la columna vertebral está formada por 33 vértebras: 7 cervicales en el cuello; 12 torácicas o dorsales en la región del tórax, a las que se unen doce pares de costillas; 5 lumbares en la zona baja de la espalda; 5 sacras fusionadas que forman un hueso sólido (conocido como sacro), que encaja como una cuña entre los huesos de la pelvis; y un número variable de vértebras fusionadas por debajo del sacro formando el coxis. [1]

Para el control de las funciones motoras se asignan segmentos medulares, compuestos por determinado número de vértebras, responsables del funcionamiento muscular.

Es de nuestro interés el desarrollo de un modelo de silla de ruedas para uso en exteriores, diseñada con el propósito de atender las necesidades del paciente activo con movilidad total en la parte superior del tronco, que desde el punto de vista médico, presenta una lesión en la columna vertebral, manifestada en los segmentos toracolumbares a partir de la vértebra torácica o dorsal número seis.

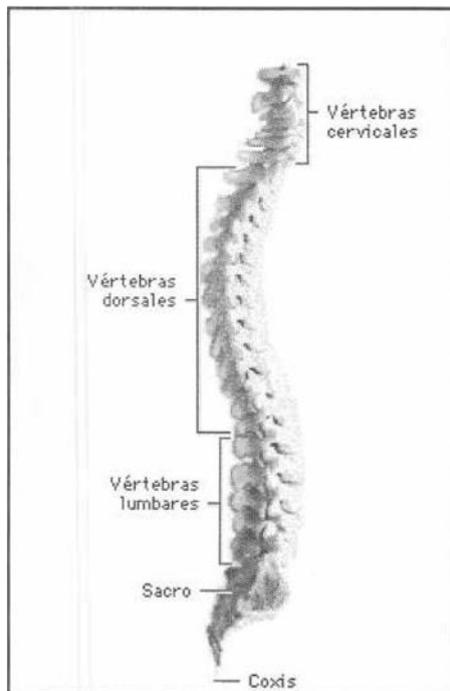


Fig. 1 Clasificación de las Vértebras

## 1.2 Componentes básicos de una silla de ruedas

Con la finalidad de cumplir con los requerimientos de la patología seleccionada, se analizará el tipo de cuadro, rueda, freno, apoya-pie y apoya-brazo que

mejor se adapten al diseño de una silla de ruedas para uso en exteriores.

### Cuadro

El cuadro de una silla de ruedas puede ser rígido (fijo), o plegable. El aprovechamiento de la energía que el usuario aplica para propulsarse es el doble en una silla con cuadro rígido (se aprovecha del 15 al 20% del impulso aplicado), que en una plegable (sólo aprovecha del 5 al 8% del impulso aplicado); esto es debido a que en una silla plegable parte de la energía de propulsión se pierde en el movimiento de su estructura por los puntos de articulación.

Otras ventajas que presenta la silla de ruedas con cuadro rígido, es que resulta fácil de manejar y es algo más ligera que una similar plegable. Sin embargo la silla plegable resulta en general más cómoda de transportar y guardar al ocupar menos espacio plegada, característica fundamental para el normal desenvolvimiento de las actividades del usuario.

### Material

La composición del cuadro es un factor clave en la funcionalidad de la silla. El acero es el material más habitual, es el más pesado pero también el más económico. Una silla con estructura de aluminio es mucho más ligera y por lo tanto fácil de propulsar, pero es más costosa. También se pueden encontrar estructuras muy ligeras como titanio, carbono y duraluminio, que se utilizan frecuentemente en sillas de cuadro rígido y tienen un precio muy elevado. Dentro de las alternativas de producción de sillas de ruedas para uso en exteriores consideradas en el presente trabajo, se tomarán en cuenta tanto el acero como el aluminio.

### Rueda delantera maciza

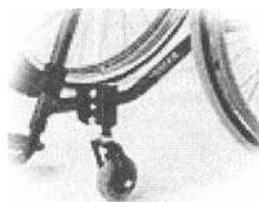
El tamaño de las ruedas delanteras puede variar desde los 75 mm hasta 200 mm de diámetro, dependiendo del uso.

Cuanto más pequeña sean las ruedas delanteras, tendrán menor rozamiento y mayor facilidad de giro, siendo adecuadas para interiores. Pueden ir desde los 75 mm hasta los 125 mm de diámetro.

Las ruedas grandes son más recomendables para exteriores y pavimentos accidentados, ya que resulta más fácil salvar obstáculos y no se atascan en el terreno.



Fig. 2 Cuadro rígido

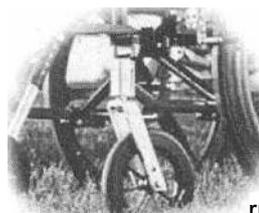


La opción intermedia para exterior e interiores la rueda de 150mm de diámetro, siendo una de las mejores a la hora de salvar algún obstáculo.

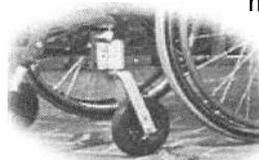
### Rueda trasera

**Fig. 3 Rueda 75mm** La rueda trasera más habitual es la de 600 mm de diámetro (24"). Se

utilizan ruedas más pequeñas de 550mm (22") o 500mm (20") en sillas para niños, personas con limitación del movimiento en los hombros o para hemipléjicos. La rueda más pequeña permite aplicar menor esfuerzo para propulsarla, pero también requiere mayor número de impulsos. Las ruedas de 650 mm (26") se utilizan para personas muy altas y las de mayor disponibilidad en el mercado venezolano, ventaja que nos lleva a seleccionarla como la mejor opción, ajustando el aro propulsor a la medida adecuada.



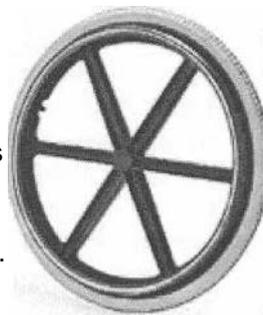
**Fig. 4 Rueda 200mm**



**Fig. 5 Rueda 150mm**

**Caucho** *Macizos* ofrecen menor resistencia al rodar, y no requieren mantenimiento, pero son más pesados y de conducción más dura al no amortiguar los accidentes del terreno. No presentan buen agarre en superficies mojadas.

*Neumáticos* Son de conducción más cómoda porque amortiguan los accidentes del terreno y presentan un buen agarre en la mayoría de las superficies. Son las más ligeras. Requieren algo más de fuerza para propulsarlas al ser más blandas y necesitan mantenimiento, se pueden pinchar y debe vigilarse la presión de aire para mantener su rendimiento. No obstante existen productos en el mercado, bombas y parches, que pueden solventar esta situación temporalmente.



**Fig. 6 Rin de plástico**



**Fig. 7 Rin de rayos de aluminio**

### Rin

*Rin de plástica* apenas requieren mantenimiento, pero pesan más que las ruedas de rayos.

*Rin de rayos de aluminio* Resulta más ligero que el de plástico, y absorbe mejor las rugosidades del terreno, siendo ideal para la silla de ruedas de uso en exteriores.

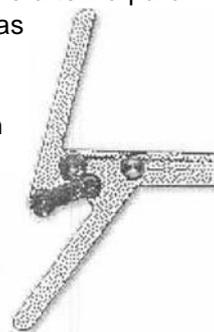


**Fig. 8 Aro con proyecciones**

### Aros propulsores

Pueden ser de aluminio, acero, titanio o recubiertos de plástico. Además del material, existen aros con proyecciones para facilitar el agarre por parte de personas con poca movilidad en las manos.

*Aros simples de acero* (sin dispositivo alternativo para facilitar el desplazamiento) cubren las necesidades de los pacientes con movilidad total en el tronco, son pesados pero resbalan menos y son más económicos.



**Fig. 9 Frenos de tijera**

### Frenos

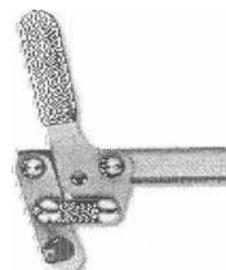
*Frenos de tijera.* Se suelen utilizar para sillas muy ligeras o deportivas. Este tipo de frenos pueden ser de montaje alto o montaje bajo (según se fijen en el tubo superior o inferior del cuadro). Estos frenos quedan recogidos por debajo del asiento cuando no se utilizan, por lo que están más protegidos de impactos y no molestan en los traslados a y de la silla de ruedas.

*Frenos de tambor.* Son frenos que no son activados por el usuario sino por el acompañante. El paciente no está en la capacidad de valerse por sí mismo. Este tipo de freno sirve para reducir la velocidad de la silla cuando esté en marcha.

*Frenos con zapata,* utilizados en la mayoría de las sillas de ruedas para uso en exteriores. Son de montaje alto (se fijan al tubo Fig. 11 Frenos con zapata que queda por debajo del asiento), y pueden ser de dos tipos, los que se activan empujando hacia delante o tirando hacia atrás.



**Fig. 10 Frenos de tambor**



### Apoya-brazos

Pueden ser desmontables o abatibles hacia atrás con distintas longitudes de almohadilla (normal o larga).

*Ajustables en altura:* la almohadilla puede colocarse en varias alturas para ajustarse a las necesidades del usuario.

*De escritorio* con forma que permite e acercamiento a mesas.

*Tubulares:* pesan menos pero tiene superficie de apoyo inferior.

Para gente activa se suelen eliminar los apoya-brazo y colocar unos protectores laterales para impedir que las ruedas ensucien la ropa.



Fig. 12 Apoya-brazos ajustables

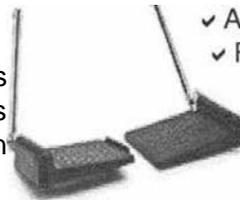


Fig. 13 Apoya-pies plataformas

### Apoya-pies

Pueden ser fijos o desmontables. Para acortar la longitud de la silla en espacios reducidos como ascensores, es mejor que sean desmontables. Si no hay problemas de espacio es más aconsejable que sean fijos.

*Elevables* Elevan el conjunto de la pierna, para adoptar posturas más cómodas. Se utilizan mucho en sillas con respaldo reclinable.

*Plataformas* pueden ser dobles o bien una plataforma única (estructura tubular) con o sin cintas taloneras.

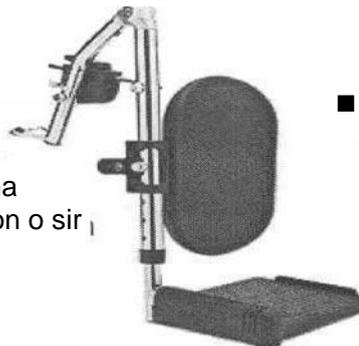


Fig. 14 Apoya-pies elevables

### Respaldo

El respaldo podrá ser reclinable o no, alto o bajo, en atención a la posiciones prescritas, eligiendo siempre el que posibilite la apertura posterior. La apertura puede realizarse mediante botones o sierras automáticos ubicados lateralmente, en consideración al lado de mayor posibilidad de movimiento.

Respaldares altos se utilizan en pacientes con poca o ninguna movilidad en la parte superior del cuerpo, reservando los respaldares cortos o bajos para personas con control normal del tronco.



Fig. 15 Respaldo alto

## 1.3 Selección de componentes de una silla de ruedas para uso en exteriores

- Plegabilidad del cuadro
- Ruedas delanteras de 150 mm de diámetro (6" )
- Ruedas traseras de 650 mm de diámetro (26")

Cauchos neumáticos

Rin de rallos de aluminio An's

✓ Apulsadores simples

✓ Frenos con Zapata

- Protectores laterales con opción a apoya-brazos ajustables

Respaldo corto

Apoya pie de estructura tubular

## 2.2 Objetivos

### 2.2.1 Objetivo General

Propuesta de diseño mecánico y análisis del proceso productivo de sillas de ruedas bajo un enfoque que integre la Ingeniería de Diseño y la Ingeniería de Manufactura.

### 2.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar la oferta y la demanda nacional de sillas de ruedas.
  - Documentar las diversas filosofías para el desarrollo de productos.
- Selección de las características de las diferentes filosofías, que mejor se adapten al desarrollo del modelo.
- Seleccionar el modelo a estudiar.
- Desarrollo Paramétrico del Modelo.
- Desarrollo del Análisis Cinemático del Modelo.
- Desarrollo del Análisis de Elemento Finito del Modelo.
- Estudiar los requerimientos de materia prima, materiales y equipos para la fabricación.
- Investigar los procesos de manufactura que se ajusten a estos requerimientos de materia prima, materiales y equipos.
  - Análisis técnico-económico de la alternativa de producción. Selección de la alternativa de producción.

## Desarrollo del producto

### 3.1 Identificar la necesidad

En Venezuela el crecimiento urbanístico no ha sido planificado, las ciudades son arquitectónica y socialmente no preparadas para quienes tienen deficiencias motoras. Son pocas las edificaciones que cuentan con la infraestructura adecuada para permitir el fácil acceso de las personas con impedimentos físicos.

Esta condición le impide a la población discapacitada potencialmente activa formar parte de un equipo de trabajo que le proporcione bienestar social, crecimiento personal y estabilidad económica, convirtiéndose en individuos totalmente dependientes de su entorno.

Una alternativa se presenta a la hora de adquirir una silla de ruedas para uso en exteriores, que por sus características de diseño es la que mejor se ajusta a la problemática.

### 3.2 Definición del problema

El mercado venezolano no ofrece sillas de ruedas para uso en exteriores con precios accesibles a la mayor parte de la población discapacitada. Esto lleva al discapacitado a adquirir modelos económicos de sillas de ruedas que no cumplen con los requisitos básicos para ser usadas en exteriores, limitando su desplazamiento y creando dependencia con el medio que lo rodea.

### 3.3 Recolección de información:

Un proceso de diseño considera características del producto y las necesidades del usuario. Es por tanto imprescindible realizar un estudio de las actividades rutinarias del paciente en silla de

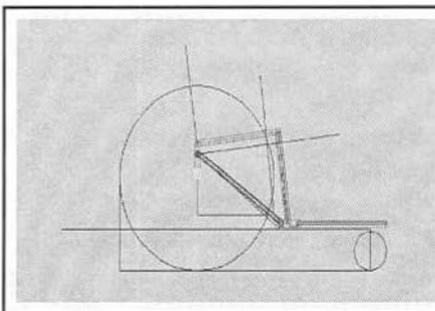


Fig. 16 Idea inicial. Bosquejo

ruedas, con el fin de diseñar un mecanismo que considere las necesidades del usuario y su entorno.

Así como las necesidades del paciente son tomadas en cuenta, es necesario considerar las características Biomecánicas y las medidas

Ergonómicas de la silla de ruedas, con el fin de diseñar un mecanismo que cumpla con los requisitos apropiados para la satisfacción y comodidad del paciente.

### 3.4 Generación de la idea

A partir de las medidas Ergonómicas y las características Biomecánicas de una silla de ruedas, se inició el desarrollo de un bosquejo que considera una estructura plegable, encargada de soportar el peso del paciente y cuatro ruedas que facilitan el desplazamiento.

### 3.5 Desarrollo del modelo.

Con la idea inicial en mente, se comienza la fase de Modelado de Sólidos, interactuando con los departamentos encargados del Análisis Dinámico, el Análisis Cinemático y el Análisis Estático Lineal, a fin lograr un diseño funcional.

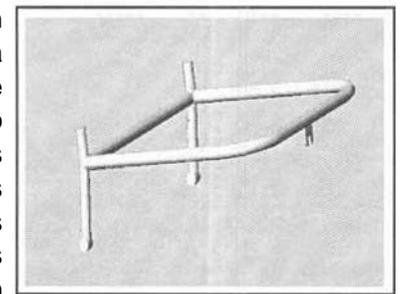


Fig. 17 Elemento Básico. Asiento

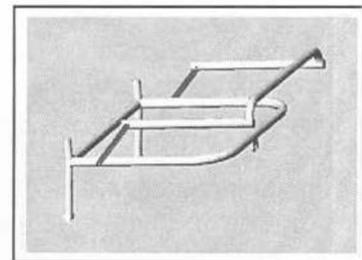
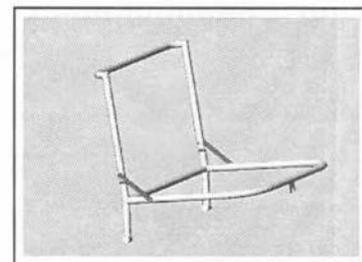


Fig. 18 Elemento básico. Respaldar

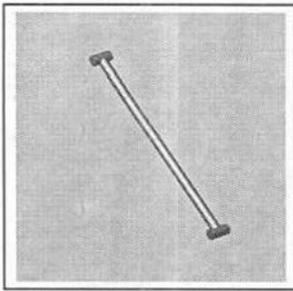


Fig. 19 Elemento básico.  
Barra central

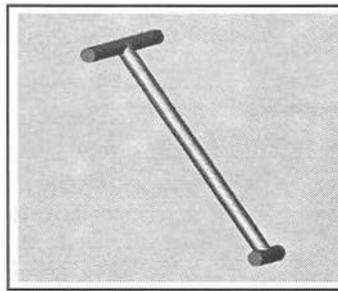


Fig. 20 Elemento básico.  
Barra frontal

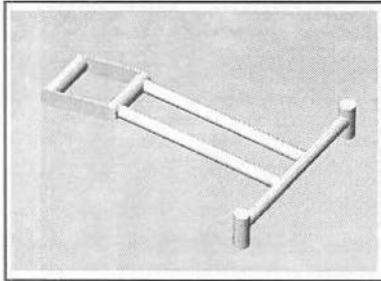


Fig. 21 Elemento básico.  
Barra inferior

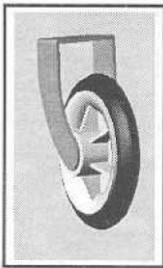


Fig. 23  
Elemento  
básico.  
Rueda  
delantera

### 3.5.1 Modelado de sólidos (I).

El primer paso a seguir dentro del Modelado de Sólidos es la construcción de los elementos básicos del modelo inicial de la silla de ruedas: el cuadro, la rueda trasera y la rueda delantera, para luego ser ensamblados.

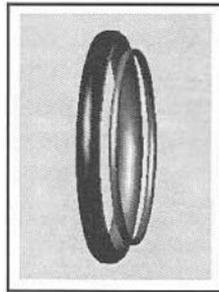


Fig. 22  
Elemento básico.  
Rueda trasera

El cuadro: compuesto por el Asiento, el Respaldo, una Barra central, una Barra frontal y una Barra inferior.

- Asiento: estructura rígida tubular que considera el soporte para el respaldo y el soporte para el eje de la rueda trasera.
- Respaldo: estructura tubular articulada con pernos en ambos laterales del asiento para permitir el plegado.

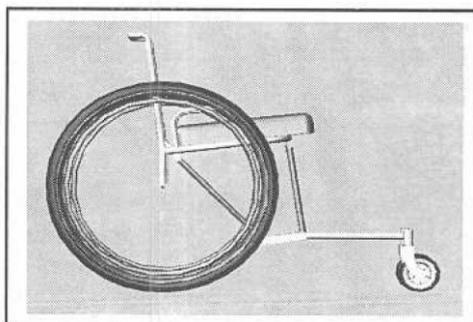


Fig. 24  
Primer  
modelo para  
simulación.  
Ensamble de  
elementos  
básicos

**Barra central:** encargada de armar la estructura completa. Este elemento se articula en la parte superior con el asiento y en el otro extremo con la barra inferior, permitiendo el plegado.

**Barra frontal:** articulada a la Barra inferior y sujeta por la parte superior al Asiento, con la finalidad de armar la estructura de la silla.

**Barra inferior,** constituye el soporte de las ruedas delanteras, se utiliza como apoya-pie y es punto de pivote de la Barra frontal y la Estructura central.

**Rueda trasera:** Con diámetro de 660 mm (26"). compuesta por el Rin, el Caucho y el Aro propulsor.

**Rueda Delantera:** Con diámetro de 150 mm (6"), compuesta por el rin, el caucho y la horquilla.

**Ensamble:** Una vez generadas las piezas básicas se procede a ensamblar el modelo de la silla, con la finalidad de exportarlo al ambiente de simulación, realizar el análisis dinámico y determinar las reacciones generadas en las uniones de las piezas.

Al mismo tiempo se desarrollaron los planos de las piezas modeladas en forma general (sin considerar detalles), así como la lista de materiales y vistas explotadas de cada una de las partes de la silla de ruedas.

Igualmente se modelan a detalle los componentes y accesorios de la silla.

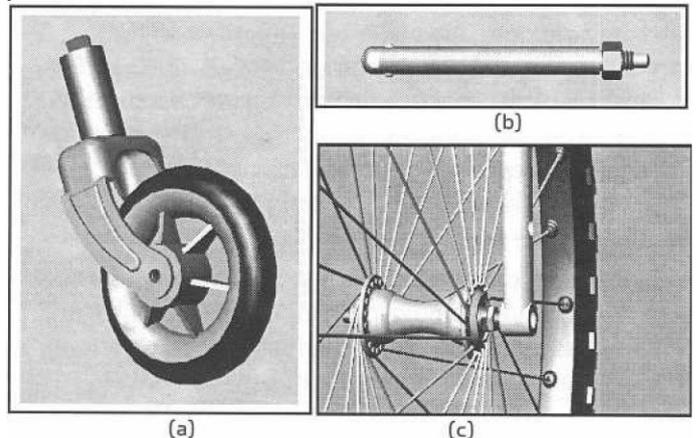


Fig. 26 Modelo detallado: (a) Horquilla, (b) Eje desmontaje rápido de la rueda trasera, (c) Rueda trasera.

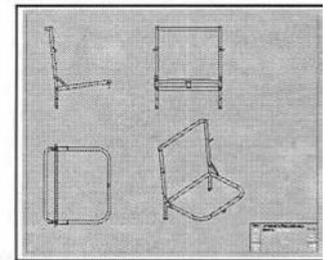
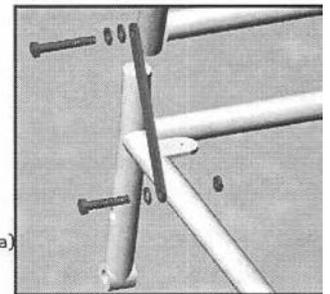


Fig. 25 Estructura Asiento-Respaldo: (a) Vista explotada, (b) Plano.

Fi. 27  
Distribución  
de fuerzas  
sobre la  
silla de  
ruedas

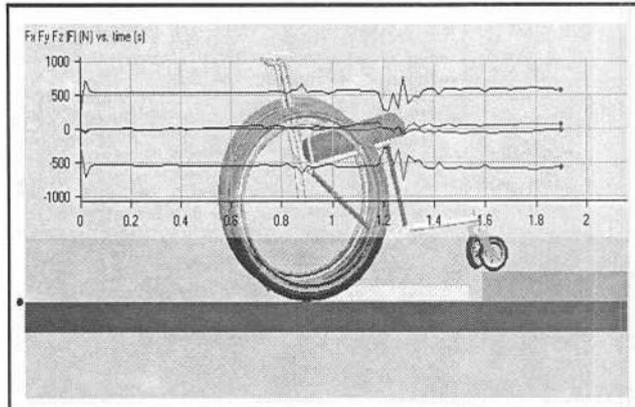
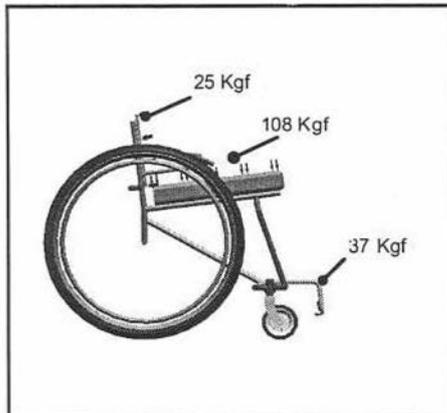


Gráfico 1  
Fuerza  
resultante  
sobre el eje  
de la Rueda  
trasera  
(primera  
interacción)

### 3.5.2 Modelado de sólidos — Análisis Dinámico (Primera interacción)

Para el Análisis Dinámico se creó un escenario que simula el descenso de la silla de ruedas por escalones, con la finalidad de llevar el mecanismo a condiciones extremas y verificar la fuerza resultante en puntos críticos (Eje de la rueda trasera).

En este análisis se consideró un sistema de fuerzas aplicadas sobre la silla de ruedas que representa el peso estándar de un hombre perteneciente al percentil 95% y la fuerza ejercida sobre el aro propulsor que se requiere para lograr el movimiento.

Se utilizó un factor de seguridad de 1.8 asignado al peso de la persona, resultando una fuerza aplicada sobre la silla de 170 Kgf distribuida sobre los puntos de apoyo: Asiento, Respaldo y Apoya-pié. Fig 27

La fuerza resultante obtenida del análisis dinámico sobre el eje de la rueda trasera, se encuentra dentro de los valores esperados. En el estado inicial (antes de bajar el escalón) la fuerza sobre el eje se aproxima al valor de 544 N, permaneciendo cercana a este valor para el intervalo de tiempo  $0.02 < t(s) < 1.16$ . Justo antes de recibir el impacto de la caída, la fuerza se reduce a su valor mínimo aproximado de 282.76 N ( $t=1.26s$ ), incrementándose hasta el valor máximo aproximado de 775.5 N al momento del impacto ( $t=1.28s$ ). Cuando las ruedas delanteras se mantienen sobre el escalón (Gráfico 1) el valor aproximado de la fuerza sobre el eje permanece cercano a 595 N ( $1.38 < t(s) < 1.84$ ).

El valor máximo de la fuerza sobre el eje se utilizará para realizar un estudio detallado de los esfuerzos que se producen sobre éste (Análisis estático lineal), una vez aplicada la carga máxima resultante.

### 3.5.3 Modelado de sólidos — Análisis Estático Lineal (Primera interacción)

En esta primera interacción se verifican los esfuerzos combinados sobre los elementos básicos del modelo con el uso de Análisis Estático Lineal. Si el esfuerzo resultante sobre el elemento es menor que el límite de fluencia del material, se aprueba el diseño y se procede al análisis del siguiente. De no ser así, es necesario rediseñar el componente.

El estudio de los esfuerzos se realizó bajo el mismo escenario del Análisis Dinámico. Los resultados que se reportan a continuación, representan el esfuerzo sobre cada elemento en el instante en que toma su valor máximo.

#### *Análisis Estático Lineal Barra Frontal.*

El esfuerzo sobre la barra frontal alcanza un valor máximo de 181.38 MPa, manteniéndose por debajo del límite de fluencia del material.

Cumpliendo con el criterio de diseño se analiza el próximo elemento.

#### *Análisis Estático Lineal. Barra Central*

El esfuerzo sobre la estructura central alcanza un valor máximo de 60 MPa, manteniéndose por debajo del límite de fluencia del material (248 MPa).

Cumpliendo con los requerimientos de diseño se analiza el próximo elemento.

#### *Análisis Estático Lineal Barra inferior.*

El esfuerzo sobre la Barra inferior alcanza un valor máximo de 381.8 MPa, sobrepasando el límite de fluencia del material (248 MPa).

El elemento no cumple con los requerimientos de diseño. Se hace necesario rediseñar el modelo a fin de solventar el problema.

Fig. 28 Análisis  
Estático lineal.  
Barra Frontal  
(Primera  
interacción)

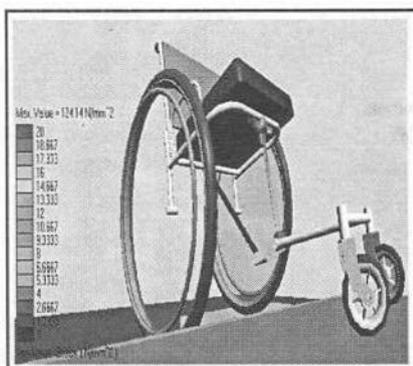


Fig. 29 Análisis  
Estático Lineal.  
Barra Central  
(Primera  
interacción)

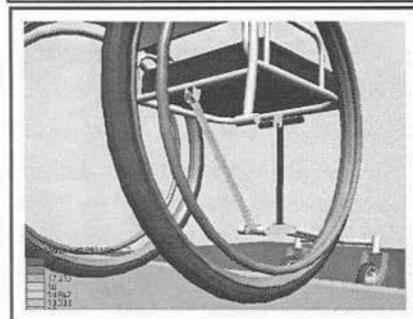
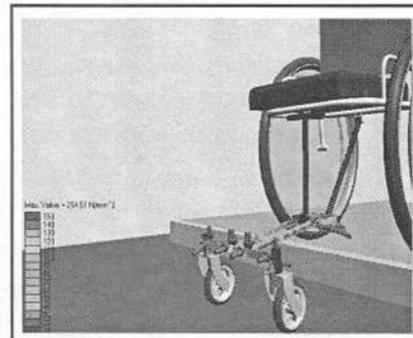


Fig. 30 Análisis  
Estático Lineal.  
Barra inferior  
(Primera  
interacción)



A la vez que se analizan los esfuerzos en los componentes de la silla de [ruedas. se](#) prepara el escenario que servirá de fondo para el fotorealismo del modelo.

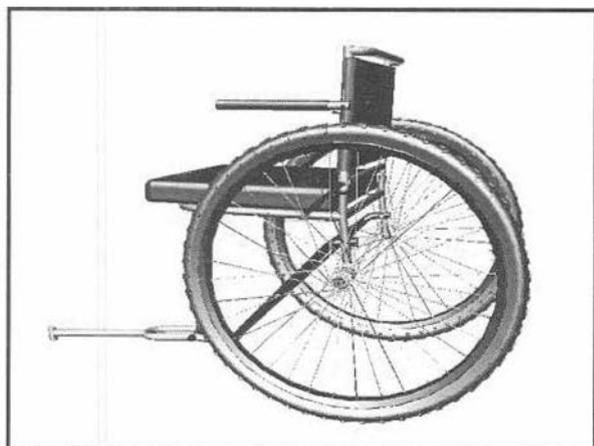


Figura 31. Interacción Modelado de Sólidos – Fotorealismo (I).

### 3.5.4 Modelado de sólidos (II)

Para solventar el problema de la Barra inferior, se propone reducir la distancia entre el Eje de la rueda delantera y el Eje de la rueda trasera. Este cambio origina modificaciones en cadena que afectan a la Barra central y a la Barra frontal, eliminando la Barra inferior del modelo original.

Las modificaciones se realizan sobre el modelo paramétrico original, obteniendo en poco tiempo la estructura básica del nuevo modelo que servirá una vez más para verificar las fuerzas y esfuerzos sobre la estructura. El asiento y las ruedas no sufren modificaciones.

#### Modificaciones en el diseño:

- Barra frontal: articulada por la parte superior al Asiento y por la parte inferior a la barra soporte de los Apoya-pie. Considera el soporte del eje para las ruedas delanteras.
- Barra Central: Articulada en la parte superior al [Asiento. se](#) conecta a la Barra frontal y arma el cuadro de la silla.
- Ensamble: Una vez generadas las piezas básicas del nuevo modelo se ensamblan, con la finalidad de exportarlo nuevamente al ambiente de simulación, realizar el análisis dinámico y determinar las reacciones generadas en las uniones de las piezas.

### 3.5.5 Modelado de sólidos — Análisis Dinámico (Segunda interacción)

Con los resultados del Modelado de Sólido se estudia la Dinámica del modelo rediseñado.

La fuerza resultante obtenida del análisis dinámico sobre el eje de la rueda [trasera. se](#) encuentra dentro de los valores esperados. En el estado inicial (antes de bajar el escalón) la fuerza sobre el eje se aproxima al valor de 431 N, permaneciendo cercana a este valor para el intervalo de tiempo  $0.16 < t (s) < 3.11$ . Justo antes de recibir el impacto de la caída, la fuerza se reduce a su valor mínimo aproximado de 140.08 N ( $t=3.13s$ ), incrementándose hasta el valor máximo aproximado de 1059.48 N al momento del impacto ( $t=3.17s$ ). Cuando las ruedas delanteras se mantienen sobre el escalón, (Gráfico 2) el valor aproximado de la fuerza sobre el eje permanece cercano a 4960.05 N ( $3.19 < t(s) < 3.87$ ),

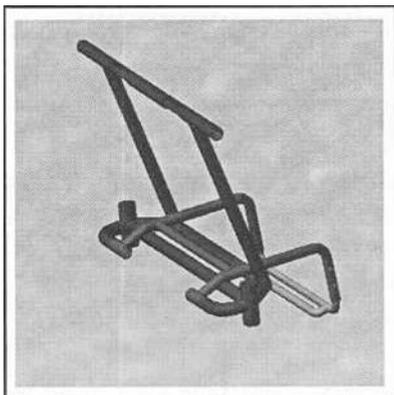


Figura 32. Elemento Básico. Barra frontal, Apoya-pies. Rediseño

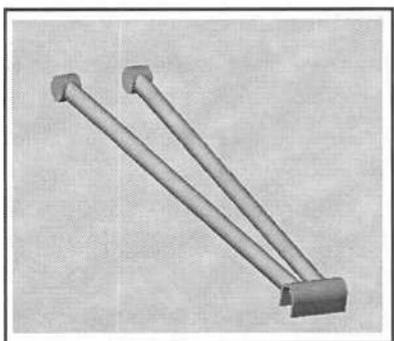


Figura 33. Elemento Básico. Barra central. Rediseño

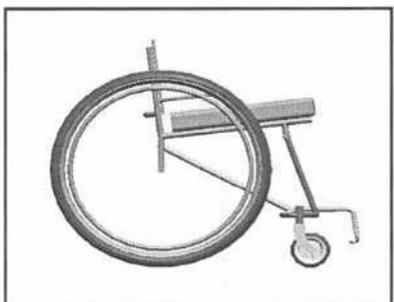


Figura 34. Segundo modelo para simulación. Ensamble de elementos básicos.

La fuerza resultante obtenida del análisis dinámico sobre el eje de la rueda delantera, se encuentra dentro de los valores esperados. En el estado inicial (antes de bajar el escalón) la fuerza sobre el eje se aproxima al valor de 520 N, permaneciendo cercana a este valor para el intervalo de tiempo  $0.02 < t \text{ (s)} < 0.94$ . Justo antes de recibir el impacto de la caída, la fuerza se reduce a su valor mínimo aproximado de 229.37 N ( $t=1.02\text{s}$ ), incrementándose hasta el valor aproximado de 1233.06 N al momento del impacto ( $t=1.08\text{s}$ ). Es importante señalar que en el segundo impacto la fuerza se incrementa a 1306.27 N, considerando este valor como la fuerza máxima sobre el eje de la rueda delantera.

### 3.5.6 Modelado de sólidos — Análisis Estático Lineal (Segunda interacción)

En esta etapa se debe verificar que los elementos básicos del nuevo modelo cumplan con los requerimientos de diseño.

#### *Análisis Estático Lineal Barra Central*

El esfuerzo sobre la Barra central alcanza un valor máximo aproximado de 105.15 MPa, permaneciendo por debajo del límite de fluencia del material (248 MPa).

Cumpliendo con los requerimientos de diseño se analiza el próximo elemento.

#### *Análisis Estático Lineal. Barra Frontal*

El esfuerzo sobre el Asiento alcanza un valor máximo aproximado de 195 MPa, permaneciendo por debajo del límite de fluencia del material (248 MPa).

Cumpliendo con los requerimientos de diseño se analiza el próximo elemento.

#### *Análisis Estático Lineal. Asiento.*

El esfuerzo sobre el Asiento alcanza un valor máximo aproximado de 219 MPa, permaneciendo por debajo del límite de fluencia del material (248 MPa).

Cumpliendo con los requerimientos de diseño se analiza el próximo elemento.

#### *Análisis Estático Lineal Horquilla.*

El esfuerzo sobre la Horquilla alcanza un valor máximo aproximado de 109.35 MPa, permaneciendo por debajo del límite de fluencia del material (248 MPa).

Los elementos básicos del nuevo modelo aprueban el Análisis Estático Lineal. Inmediatamente se ordena la construcción del prototipo físico que se utilizará en la fase de prueba y se procede al análisis detallado de los componentes adquiridos ( Eje ueda delantera, Eje rueda trasera, Soporte eje rueda delantera, Soporte eje rueda trasera.) con el fin de verificar su funcionalidad dentro del diseño propuesto.

#### *Análisis Estático Lineal Eje rueda trasera.*

El diámetro mayor del eje es de 13 mm, con un espesor de pared de 2.5 mm. Contiene un mecanismo interno que permite el desmontaje del eje, a fin de retirar las ruedas del cuadro y completar el plegado.

El esfuerzo sobre el eje de la rueda trasera, producto de una carga máxima aplicada de 1059,48 N, alcanza un valor máximo aproximado de 176 MPa, permaneciendo por debajo del límite de fluencia del material (345 Mpa).

*Análisis Estático Lineal Soparte eje rueda trasera.*

El esfuerzo sobre el eje de la Rueda trasera, de 53 mm de largo y 3 mm de espesor de pared, alcanza un valor máximo aproximado de 67.8 MPa, permaneciendo por debajo del límite de fluencia del material (235 MPa).

*Análisis Estático Lineal Eje rueda delantera.*

Un tornillo de 8 mm de diámetro y 65 mm de largo sirve de eje en la Rueda delantera.

El esfuerzo sobre este eje, producto de una carga máxima aplicada de 1306 N, alcanza un valor máximo aproximado de 152 MPa, permaneciendo por debajo del límite de fluencia del material (275 MPa).

*Análisis Estático Lineal. Soporte eje rueda delantera.*

El esfuerzo sobre el Soporte de la rueda delantera, de 32 mm de diámetro, un espesor de pared de 2 mm en la zona de los rodamientos y 3mm en la zona central, alcanza un valor máximo aproximado de 151 MPa, permaneciendo por debajo del límite de fluencia del material (235 MPa).

De esta forma se corrobora la funcionalidad de los elementos adquiridos, dentro del modelo de silla de ruedas que se propone.

**3.6 Cinemática del plegado.**

El análisis de cinemática se realizó con el propósito de estudiar el plegado de la silla, la interferencia de los componentes en el plegado y el espacio que ocupa luego de ser plegada. Para completar el plegado se retiran las ruedas del cuadro.

Del análisis se encuentra que la silla pliega sin ningún problema, no existen interferencias entre los elementos que la componen y ocupa un espacio de 45 cm de ancho x 50 cm de largo x 25 cm de alto, lo que resulta un volumen de 0.0562 m<sup>3</sup>

**3.6.1 Interacción Modelado de Sólidos — Foto realismo (II)**

Aprovechando el ambiente creado en el modelo inicial se desarrolla el foto realismo del segundo modelo, obteniendo un prototipo virtual que contiene toda la información necesaria para el análisis y producción del modelo además de recrear el acabado final del producto.

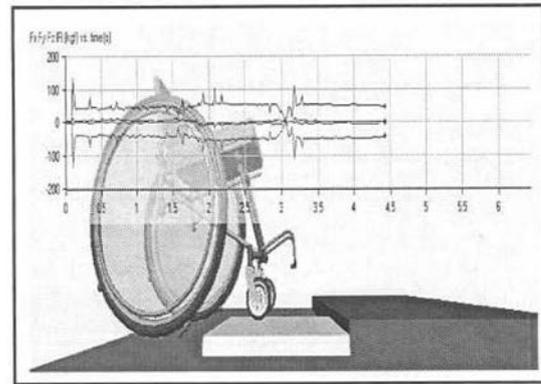


Gráfico 2: Fuerza resultante sobre el eje de la Rueda trasera. (Segunda interacción)

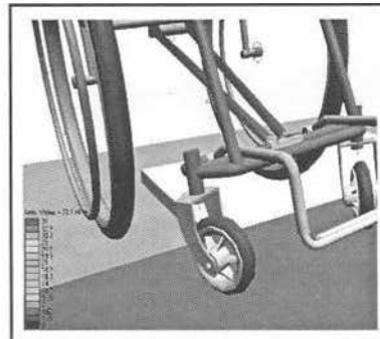


Figura 35. Análisis Estático Lineal. Barra Central. (Segunda interacción)

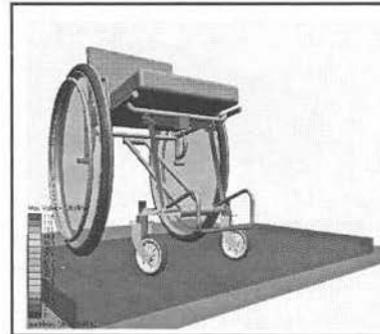


Figura 36. Análisis Estático Lineal. Barra frontal. (Segunda Interacción)

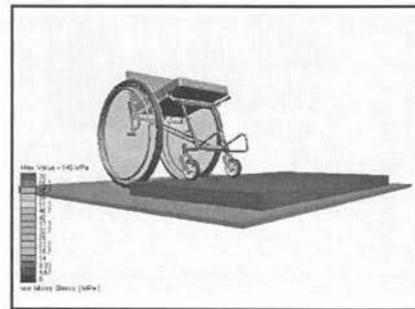


Figura 37. Análisis Estático Lineal. Asiento (Segunda interacción)

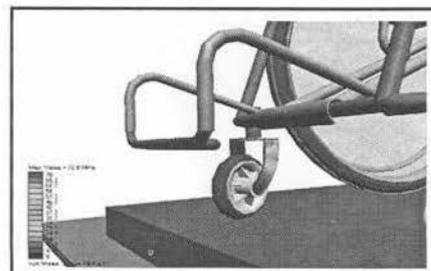


Figura 38. Análisis Estático Lineal. Horquilla. (Segunda interacción)

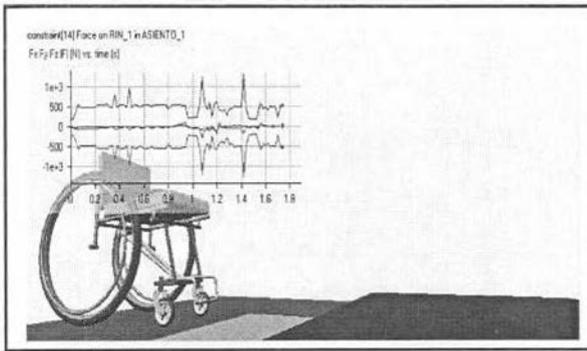


Gráfico 3: Fuerza resultante sobre el eje de la Rueda delantera. (Segunda interacción)

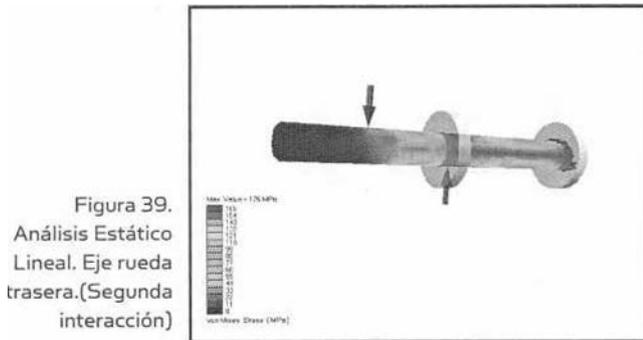


Figura 39. Análisis Estático Lineal. Eje rueda trasera. (Segunda interacción)

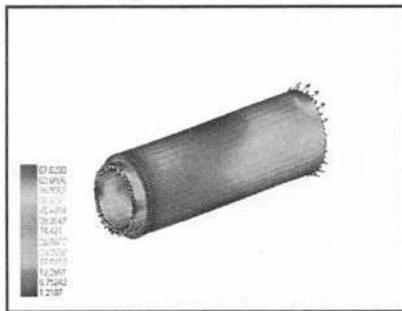


Figura 40. Análisis Estático Lineal. Soporte eje rueda trasera. (segundas interacción)

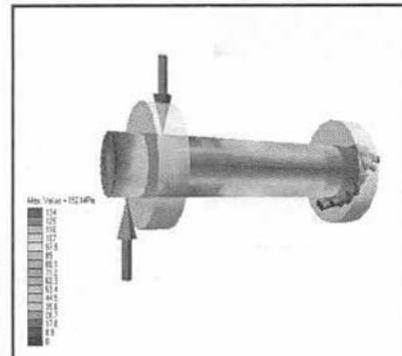


Figura 41. Análisis Estático Lineal. Eje rueda delantera. (Segunda interacción)

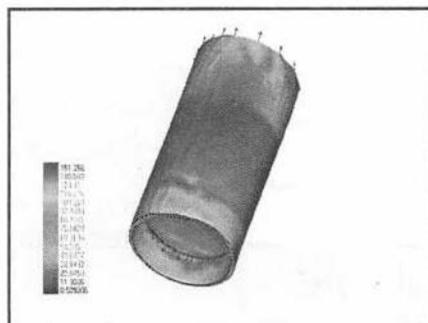


Figura 42. Análisis Estático Lineal. Soporte eje rueda delantera. (Segunda interacción)

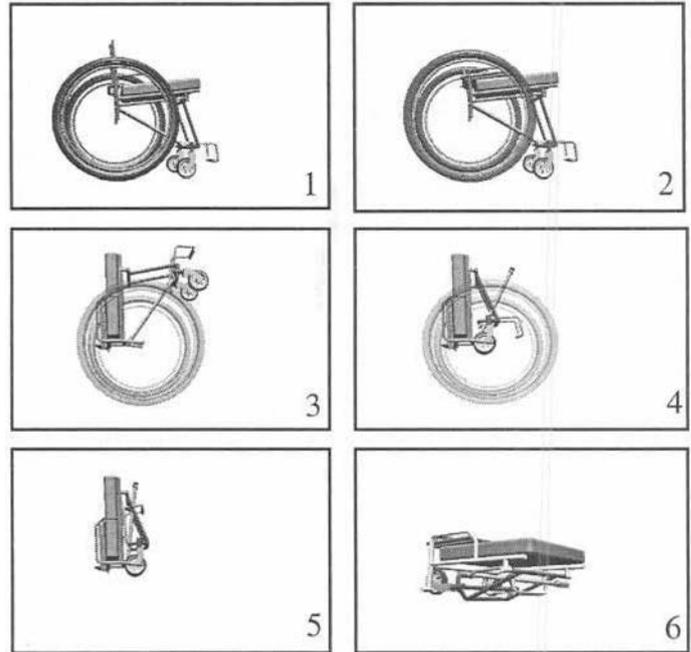


Figura 43. Cinemática de plegado

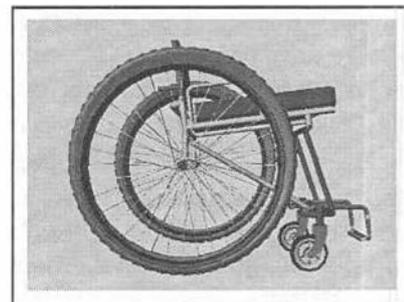


Fig 44. Interacción modelado de Sólidos – Foto realismo (II)

### 3.7 Tolerancia

Con la finalidad de determinar las dimensiones límite de los componentes de la silla de ruedas y corroborar si el sistema de producción que se propone es capaz de cumplirlo, se le asigna a cada componente el margen de tolerancia recomendado por la Norma DIN 7168 (Discrepancias admisibles) para longitudes y ángulos, asumiendo un grado de exactitud medio.

### 3.8 Construcción del prototipo

La construcción del prototipo ratificó la estabilidad del modelo, la plegabilidad de sus componentes y la factibilidad de manufactura, cumpliendo con la última etapa del proceso del diseño para manufactura.



Fig.45 Prototipo

### 3.9 Especificaciones del diseño final.

La siguiente tabla reporta las dimensiones finales del modelo y el peso total de la silla. El diseño cumple con las dimensiones globales establecidas por la Norma Venezolana COVENIN 2906-92 (ISO 7193-85).

Tabla 1. Medidas finales de la Silla de ruedas.

Silla de ruedas para uso en exteriores	
Dimensión	cm
 Ancho del asiento	43
 Ancho de la silla	67
 Distancia eje rueda trasera- cuadrante de la rueda trasera	75
 Largo de la silla	98
 Alto del respaldo	39
 Alto de la silla	93
 Largo del asiento	43
 Peso de la silla (kgf)	16.5

### 3.10 Diseño para Manufactura

A continuación se describe la evolución del respaldo bajo el enfoque de Diseño para Manufactura.

Para hacer funcional la idea inicial del respaldo se requería de dos barras pivote en los laterales del asiento, fijas por 3 pernos en cada extremo y pivotantes en la parte inferior.

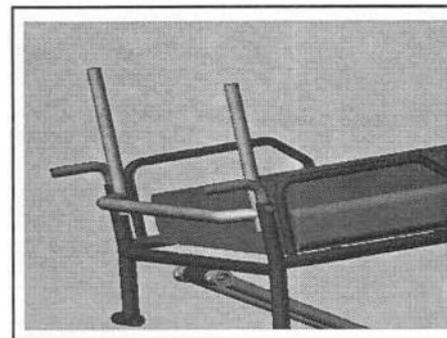


Fig.46 Tercer rediseño. Respaldo

A éste se le sumaban 2 pernos más, encargados de sostener los Apoya-brazos y una barra central con la función de armar la estructura.

Desde el punto de vista de manufactura, se pensó en reducir los 8 pernos de la estructura, así como las 16 perforaciones que se requerían.

Con el objetivo en mente, el departamento de diseño ideó un punto de soporte natural bajo el asiento, eliminando las barras laterales del modelo anterior y conservando 2 pernos que facilitan el plegado del respaldo.

En esta fase se diseñan los seguros posteriores, que impiden que el respaldo salga de posición, cuando se ayuda al paciente a salvar un obstáculo en la vía.

Este modelo de respaldo cuenta con 4 dobleces, 2 en la parte superior y 2 en la parte inferior, 2 pernos laterales sujetos al asiento, 4 pernos posteriores que sostienen el seguro, 10 perforaciones, además de la barra central que une la estructura del respaldo.

El departamento de Manufactura plantea la posibilidad de reducir ahora el número de dobleces que se necesitan en este modelo.

Para lograrlo se diseña un tope natural que no requiere del doblez del modelo anterior. Soldado al tubo del respaldo, una pletina en forma de L topa con el tubo del Asiento, manteniendo el respaldo en el ángulo requerido.

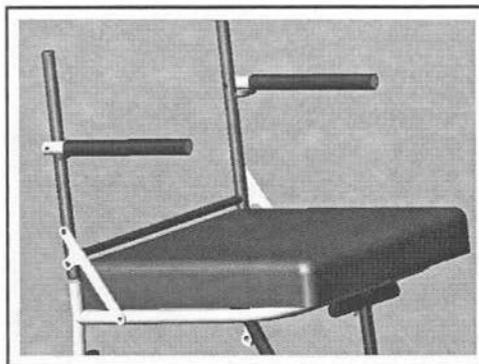


Fig.47 Idea Inicial.  
Respaldar

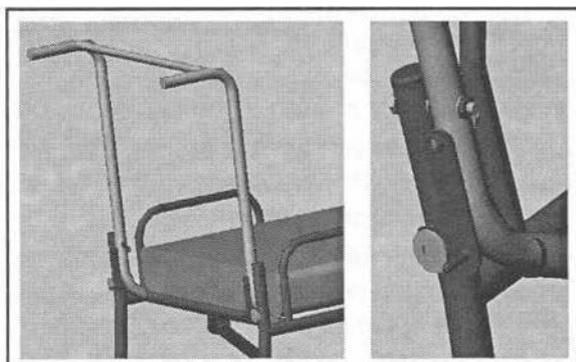


Fig.48  
Primer  
rediseño.  
Respaldar

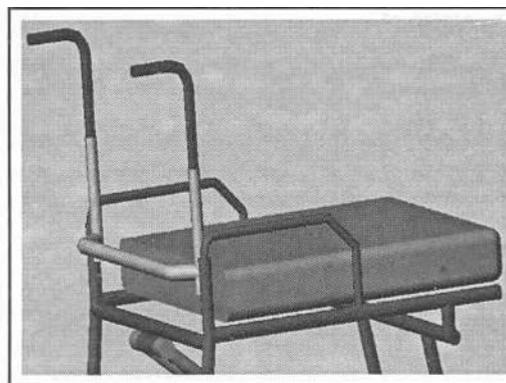


Fig.49  
Segundo  
rediseño.  
Respaldar

Por último el departamento de Manufactura le propone el reto al departamento de Diseño, de disminuir aún mas el número de piezas, pernos y perforaciones que se requieren.

Como resultado se tiene un modelo de respaldo que cuenta solo con 2 pernos, 4 perforaciones y dos dobleces, considerando un tope natural contra el asiento.

Los manubrios se colocaron en la parte baja del asiento, cumpliendo con dos funciones: 1) Ayudar al paciente a salvar algún obstáculo y 2) reforzar el tubo que sostiene el perno lateral.

Bajo este concepto ya no se requiere el seguro posterior.

El resto de los componentes de la silla de ruedas se trabajó bajo el mismo enfoque, obteniendo los resultados que se reflejan en el prototipo final.

## CONCLUSIONES

- 1 De las filosofías investigadas, la Ingeniería Concurrente es la que mejor se adapta a los requerimientos de la producción de sillas de ruedas, integrando el desarrollo del producto bajo la metodología de *Diseño para Manufactura*, sin la necesidad de un alto nivel tecnológico y el manejo de un elevado volumen de información.
- 2 La elaboración de productos alternas del mismo ramo, bastones médicos, muletas, andaderas, camas clínicas, barandas para camas clínicas, representan una alternativa a la hora de aumentar el porcentaje de utilización de las máquinas y diversificar la cartera de producto de la empresa.
- 3 La silla de ruedas para uso en exteriores le brinda al discapacitado potencialmente activo (con movilidad total en la parte superior del tronco) la oportunidad de formar parte de un equipo de trabajo que le proporcione bienestar social, crecimiento personal y estabilidad económica.
- 4 El modelo que se propone cumple con los requerimientos de una silla de ruedas para uso en exteriores: plegabilidad, estabilidad, apoya-pies desmontables y apoyabrazos bajos, convirtiéndose en un mecanismo que le permite a la persona discapacitada poder desplazarse de un lugar a otro.
- 5 El desarrollo concurrente del modelo de la silla de ruedas, bajo un enfoque que integra el Diseño y la Manufactura, permite detectar errores de diseño en etapas tempranas, minimizar el número de partes y simplificar el diseño
- 6 El precio de venta en fábrica es de 185.022,00 Bs., recuperando la inversión en un periodo aproximado de 7 meses, con un volumen de producción de 595 sillas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [ 1 ] Enciclopedia Microsoft Encarta 2000
- [ 2] PARRA, J., *Guia de Anatomía Dinámica y Funcional del sistema nervioso y órganos de los sentidos*
- [ 3] PALACIOS, L., *Principios esenciales para realizar proyectos*, 2<sup>da</sup> Edición. Publicaciones Universidad Católica Andrés Bello, 2000
- [ 4] BACA, G., *Evaluación de Proyectos*, 3a Edición. Editorial Mc Graw Hill, 1995
- [ 5] GROOVER, M., *Fundamentos de Manufactura Moderna*, Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.,1997