

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

---

## Silla de ruedas motorizada

---

*Autor:*  
Jesús MONTES  
Angel RAMÍREZ

*Supervisor:*  
Dr. Adrián ESPINOZA

*Qué con la finalidad de acreditar la materia*

*de*

Seminario de Ingeniería  
División de Ingeniería Mecánica e Industrial

15 de junio de 2018



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## *Resumen*

Facultad de Ingeniería  
División de Ingeniería Mecánica e Industrial

Seminario de Ingeniería

### **Silla de ruedas motorizada**

by Jesús MONTES  
Angel RAMÍREZ

Existe una real necesidad en el mercado mexicano de una silla de ruedas que proporcione a los usuarios una ventaja sobre las actuales opciones, en el presente trabajo se plantea una solución de ingeniería para esta necesidad. Se describe dicha solución en la cual, mediante los recursos que proporciona la ingeniería mecatrónica, se amplian las características de una silla de ruedas tradicional a las de una *smart wheelchair*. Siguiendo las premisas de un proyecto sustentable y fundamentado en la tecnología actualmente disponible.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Estado del arte . . . . .	1
1.2. Breve historia de las sillas de ruedas . . . . .	2
1.3. Implicaciones médicas . . . . .	3
1.3.1. Postura adecuada para el usuario . . . . .	3
1.3.2. Tamaño del asiento . . . . .	4
1.3.3. Forma y ángulo del asiento-respaldo . . . . .	5
1.3.4. Postura en sedestación . . . . .	5
1.3.5. Cojín . . . . .	5
1.3.6. Soporte para los pies . . . . .	6
1.3.7. Soporte para los brazos . . . . .	7
<b>2. Planeación del producto</b>	<b>9</b>
2.1. Mercado . . . . .	9
2.1.1. Discapacidad en México . . . . .	9
2.2. Modelo de negocio . . . . .	11
<b>3. Propuesta tecnológica</b>	<b>13</b>
3.1. Silla de ruedas inteligente . . . . .	13
3.2. Componentes . . . . .	13
3.2.1. Esquema físico . . . . .	14
3.3. Interfáz de usuario . . . . .	15
3.4. Sistema de control . . . . .	15
3.5. Sistema de potencia . . . . .	16
3.5.1. Almacenamiento . . . . .	16
3.5.2. Entrega de potencia . . . . .	16
3.6. Sensores . . . . .	17
<b>4. Desarrollo e implementación</b>	<b>19</b>
4.1. Diseño estructural . . . . .	19
4.1.1. Joystick de interfaz . . . . .	20
4.1.2. Módulo de control . . . . .	20
Dimensiones . . . . .	20
Posicionamiento . . . . .	21
4.1.3. Sistema de potencia . . . . .	21
4.2. Hardware . . . . .	23
4.2.1. Esquema de componentes . . . . .	23

4.3. Software . . . . .	24
5. Conclusiones	25
5.1. Resultados obtenidos . . . . .	25
A. Controlador PID para motores de DC	27
A.1. Controlador PID . . . . .	27
Bibliografía	29

# Índice de figuras

1.1. Clasificación general de sillas de ruedas . . . . .	2
1.2. Representación del filosofo Chino Confusio en una silla de ruedas, situado en el año 1680 . . . . .	2
1.3. Correcta posición del usuario . . . . .	4
1.4. Tamaño del asiento . . . . .	5
1.5. Forma y ángulo . . . . .	5
1.6. Soporte para los pies . . . . .	7
1.7. Soporte para los brazos . . . . .	7
2.1. Proceso de planeación de un producto (Ulrich y Eppinger, 2012) . . . . .	10
2.2. Porcentaje de la población con discapacidad según dificultad en la actividad (Año 2010) (INEGI, s.f.) . . . . .	10
3.1. Definición esquemática de la solución . . . . .	14
3.2. Silla de ruedas tradicional y manual . . . . .	14
3.3. Joystick tradicional . . . . .	15
3.4. Banco de baterias; 12v . . . . .	16
3.5. Par de motores de DC . . . . .	16
4.1. Modelo de silla, base de solución . . . . .	19
4.2. Vista lateral de silla . . . . .	20
4.3. Interfaz de usuario incrustada en reposabrazos . . . . .	20
4.4. Raspberry pi: dimensiones . . . . .	20
4.5. Arduino: dimensiones . . . . .	20
4.6. Controlador de motores . . . . .	21
4.7. <i>Enclosure</i> del sistema de control . . . . .	22
4.8. El sistema de potencia se ubica bajo el asiento . . . . .	22
4.9. Diagrama esquemático de componentes . . . . .	23
4.10. Componentes de software . . . . .	24



# Índice de cuadros

1.1. Consecuencias de elegir mal una silla de ruedas (Turner, 2003) . . . . .	4
---	---



## Capítulo 1

# Introducción

### 1.1. Estado del arte

En la actualidad existen, sin duda, una gran opción de artefactos que bien puede considerarse suplen o satisfacen la necesidad de las personas por una *Silla de Ruedas*, desde aparatos tradicionales impusados por el mismo usuario, hasta dispositivos robóticos con habilidades distintas como la *iBOT* que escala (msu.edu, 2016).

En la actualidad es posible identificar al menos las siguientes categorías de sillas de ruedas:

- Sillas manuales auto-operadas
- Manuales con propulsión asistida
- Sillas motorizadas
- Scooters de movilidad
- Sillas operadas por un sólo brazo
- Reclinables
- Sillas de pie
- Sillas de ruedas para deportes
- De todo terreno
- Auto balanceadoras
- Sillas de ruedas inteligentes

Estas variedades de tipos difieren por distintos aspectos, método de propulsión, mecanismos de control y/o tecnología utilizada. Algunas sillas son diseñadas para uso diario, otras para actividades individuales, o para que el usuario logre ejecutar necesidades muy específicas. La innovación en el segmento es relativamente común, sin embargo muchos intentos recientes han caido en el desuso debido principalmente a dos aspectos, o son demasiado especializados, o no logran aterrizar en el mercado en un punto de precio accesible.

En general, las sillas de ruedas son vehículos que facilitan la movilidad a pacientes que no pueden caminar ni desplazarse por si mismos con otros dispositivos, facilitando así su autonomía e integración social. (Gorgues, 2005)

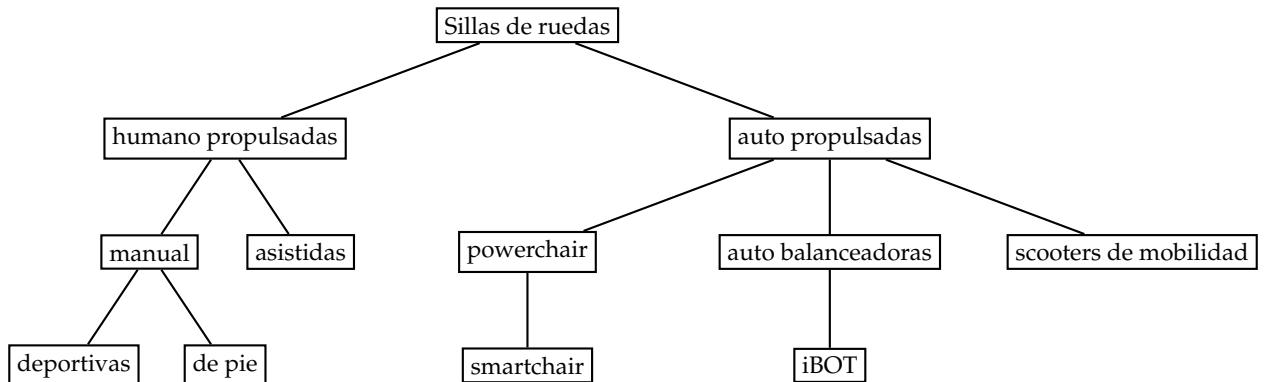


FIGURA 1.1: Clasificación general de sillas de ruedas

## 1.2. Breve historia de las sillas de ruedas

Los registros más antiguos de algún tipo de mueble con sillas son de una inscripción tallada en piedra en la antigua China y de una cama de niño descrita en una vasija Griega ambos registros datan de entre el siglo quinto y sexto después de Cristo (wheelchair-information.com, 2017).

Los primeros registros de una silla de ruedas utilizada con la intención de transportar a una persona minusválida datan de tres siglos después en China; los Chinos utilizaban carretillas para mover tanto personas como objetos pesados. Una distinción entre estas dos acciones no fue hecha si no hasta alrededor del año 525 de nuestra era, cuando imágenes de sillas con ruedas hechas específicamente para transportar personas empezaron a aparecer en el arte Chino. (Koerth-Baker, 2012)



FIGURA 1.2: Representación del filósofo Chino Confusio en una silla de ruedas, situado en el año 1680

Aunque los europeos eventualmente desarrollaron un diseño similar, este método de transporte no existió si no hasta el año 1595 cuando un inventor español desconocido construyó una silla para el rey Phillip II. Aunque este diseño aún presentaba algunas desventajas sobre todo de movilidad pues no estaba completamente implementado un sistema de propulsión eficiente y era necesario la asistencia de terceros, haciendo este diseño más similar a un trono portátil que a una silla de ruedas moderna (wheelchair-information.com, 2017).

En 1655, Stephan Farffle, un reojero de 22 años de edad, parapléjico, construyó la primera silla de ruedas auto propulsada en un chasis de tres ruedas utilizando un sistema de manivelas y ruedas dentadas. Sin embargo, el dispositivo tenía la apariencia de una bicicleta de manos más que de una silla de ruedas.

Para 1933 Harry C. Jennings, Sr. y su minusválido amigo Herbert Everest, ambos ingenieros mecánicos, inventaron la primera silla de ruedas, plegable, portable, ligera y de acero (Everest y Jennings, 1937).

Everest se había roto la espalda en un accidente minero con anterioridad. Ambos vieron una posibilidad en el mercado y pronto se convirtieron en los primeros en manufacturar para el mercado de masas de las sillas de ruedas. Su modelo *X-brace*, aunque con algunas diferencias, aún se encuentra en uso.

## 1.3. Implicaciones médicas

Son muchas las horas que los usuarios pasan en su silla de ruedas, por ello esta debe ser personalizada para adaptarse a su cuerpo y necesidades. La silla de ruedas correctamente ajustada será más cómoda para sentarse, hacer maniobras más eficientes reducir las tensiones esqueléticas y musculares causadas por los movimientos naturales de la propulsión, por ello se llega a concluir que 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. Si se escoge una silla no apropiada, puede resultar incomoda e incluso la energía del usuario se malgastará de manera innecesaria debido al esfuerzo continuado para modificar su postura (referirse al cuadro 1.1)

### 1.3.1. Postura adecuada para el usuario

Para el cuerpo humano es complicado mantener la posición sedente y simétrica durante períodos largos y en distintas tareas, a esta nos referimos cuando el cuerpo está posicionado con cadera, rodilla y tobillos con una angulación articular de 90°, si bien esta es la posición sedente que la bibliografía ha considerado la correcta, es imposible conseguirla o mantenerla por mucho tiempo. Es importante considerar que el cuerpo humano inconscientemente es capaz de adoptar comportamientos o posturas básicas para conseguir la estabilidad, comodidad o función:

- Desplazar la pelvis en una inclinación posterior y llevar el tronco hacia atrás en un apoyo posterior
- Desplazar la pelvis en una posición anterior, inclinando el tronco hacia adelante y descansando los brazos sobre una superficie

CUADRO 1.1: Consecuencias de elegir mal una silla de ruedas (Turner, 2003)

Problemas	Consecuencia
Asiento demasiado ancho	Postura inestable en sedestación Dificultad para alcanzar ruedas y auto propulsarse Barreras arquitectónicas
Asiento demasiado estrecho	Incomodidad al sentarse Riesgo de hacer ulceras por presión Dificultad para realizar transferencias
Asiento demasiado profundo	Disminuye circulación de miembros inferiores Molestia en el hueco poplítico
Asiento poco profundo	Insuficiente apoyo para sentarse Aumento de la presión en zona de apoyo
Asiento demasiado alto	Dificultad para transferirse y sentarse en la silla Dificultad con objetos de altura estándar Disminuye la eficacia de la auto propulsión
Asiento demasiado bajo	Escaso apoyo al sentarse Disminuye la eficacia de la autopropulsión



La óptima posición para la mayoría de los usuarios de sillas de ruedas es de un ángulo de inclinación del respaldo de 90 - 100°y un ángulo de la rodilla de 90 - 120°

FIGURA 1.3: Correcta posición del usuario

- Inclinar la pelvis hacia un lado y el tronco lateralmente en la superficie

Una silla de ruedas únicamente resulta útil para su usuario si le proporciona comodidad y una base de asiento estable que le permita, entre otras cosas:

- Sentarse erguido en una posición cómoda y funcional, ref.1.3
- Conseguir la máxima capacidad funcional con el mínimo gasto de energía
- Reducir la presión que soporta en los gluteos y muslos (Willard y Spackman, 2005)

### 1.3.2. Tamaño del asiento

La profundidad del asiento es esencial para proporcionar la cantidad correcta de apoyo debajo de los muslos. La longitud óptima del asiento debe ser aquella que estando el usuario bien sentado (erguido) deje una distancia aproximada de dos dedos

de espacio entre el final del asiento y el huevo poplítico. El ancho del asiento debe considerar 2,5cm entre los muslos y el lateral de la silla, para evitar puntos de presión y oblicuidad pélvica.



FIGURA 1.4: Tamaño del asiento

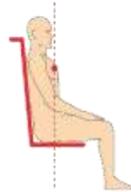


FIGURA 1.5: Forma y ángulo

### 1.3.3. Forma y ángulo del asiento-respaldo

El asiento debe ser firme y estar nivelado. Cuando se mantiene una buena postura, el ángulo de la cadera es fundamental ya que determina la estabilidad de la pelvis. El respaldo debe estar ligeramente reclinado para que la fuerza de la gravedad recaiga sobre el pecho del usuario ayudándole a mantenerse estable en la silla. A menudo los usuarios requieren de la gravedad para ayudar a equilibrar sus troncos, que no pueden mantener una postura erguida, o que necesitan descansar con el fin de aliviar la presión en los glúteos. *Inclinación respaldo-asiento deberá estar entre 90 – 120°*; pues se puede adaptar mejor a diferentes circunstancias. ref. 1.5

### 1.3.4. Postura en sedestación

Una postura adecuada en posición de sentado estimula el uso total de los campos visuales, así mismo la tolerancia de mantenerse sentado. Una buena posición sedente:

- Evita contracturas
- Estimula el sistema sanguíneo y nervioso
- Favorece la capacidad de respiración y digestión
- Previene úlceras
- Evita cansancio corporal
- Normaliza tono muscular

### 1.3.5. Cojín

Tiene como principal objetivo la protección de tejidos blandos, mantener el control postural, alineación, estabilidad y comodidad. La eficacia de un cojín se puede valorar explorando la integridad de la piel cuando el usuario ha pasado tiempo sentado. La elección de un cojín se basa en sus propiedades:

**Densidad** Cociente entre la cantidad de material y el área cúbica

**Rigidez** Fuerza de resistencia a compresión

**Características térmicas** Conducir o aislar calor y humedad

**Fricción** Capacidad para mantener una posición y cambiarla si es necesario

Entre otros ejemplos se pueden encontrar en este rubro las siguientes opciones:

- Cojín de gel

**pro** Mayor protección de la piel

**pro** Larga vida útil

**pro** Mejor disipación de calor

**contra** Pesados

**contra** Aumento de la humedad en la piel

**contra** Reducción de la estabilidad

- Cojín de aire

**pro** Buena distribución del peso

**pro** Máxima protección de la piel

**pro** Livianos

**pro** Cómodos

**contra** Mala estabilidad postural

**contra** Muy costosos

**contra** Dificultad en transferencias

**contra** Hay que controlar con frecuencia la presión de aire

- Cojín de hule espuma

**pro** Livianos y económicos

**pro** Fáciles de modificar

**pro** Pueden absorber humedad

**contra** No pueden ser lavados

**contra** Causan aumento de la temperatura de la piel

**contra** Poca vida útil

### 1.3.6. Soporte para los pies

Desde el punto de vista ergonómico los reposapiés deberían de ser de 90°; sin embargo en adultos, normalmente no se da, porque de esta forma las plataformas del reposapiés impiden el libre giro de las ruedas delanteras. La altura a la que estén colocadas las plataformas también es importante, por ello en ambos casos, simplemente debe buscarse la alineación articular. El asiento completo debe ser suficientemente alto para que el reposapiés pueda evitar los obstáculos y lo suficientemente bajo como para que las rodillas quepan debajo de las mesas. ref. 1.6



FIGURA 1.6: Soporte para los pies

### 1.3.7. Soporte para los brazos



FIGURA 1.7: Soporte para los brazos

Los reposabrazos procuran descanso a los brazos y liberan tensión de los músculos del cuello. La presencia de este accesorio se condiciona a las preferencias personales y al nivel de función y equilibrio. Los apoyabrazos proporcionan apoyo adicional si se tiene equilibrio de tronco limitado y actúan como anclajes de estabilidad lateralmente. La altura de este no debe interferir con le aro propulsor y los codos deben estar ligeramente por delante de los hombros. Regularmente los antrbrazos del usuario apoyados deben quedar a 90°del codo. ref. 1.7



## Capítulo 2

# Planeación del producto

### 2.1. Mercado

El proceso de planeación empieza con una identificación de oportunidades para el desarrollo de un producto. Estas oportunidades pueden abarcar cualquiera de los cuatro tipos de proyectos que se describen a continuación.

Los proyectos de desarrollo de productos se pueden clasificar en:

- Nuevas plataformas de productos: Este tipo de proyecto comprende un gran esfuerzo de desarrollo para crear una nueva familia de productos basados en una plataforma común. La familia del nuevo producto abordaría mercados y categorías de productos ya conocidos.
- Derivados de productos existente: Estos proyectos amplían una plataforma de productos ya existentes para satisfacer mejor los mercados conocidos con uno o más productos nuevos.
- Mejoras incrementales a productos existentes: En estos proyectos solo se agregan o modifican algunas funciones a productos existentes para mantener actualizada y competitiva la línea del producto.
- Productos fundamentalmente nuevos: Estos proyectos abarcan tecnologías radicalmente nuevas de producción o de producto y pueden ayudar a entrar en mercados nuevos y desconocidos. Estos proyectos involucran en forma inherente más riesgo; no obstante, el éxito a largo plazo de la empresa puede depender de lo que se aprende en estos importantes proyectos.

El tipo de proyecto que comprende este documento será el de mejoras incrementales a productos existentes, una vez identificado este segmento se realizó la revisión a detalle sobre el primer paso del proceso de planeación del producto.

#### 2.1.1. Discapacidad en México

De acuerdo con la Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud, presentada en 2001, las personas con discapacidad “son aquellas que tienen una o más deficiencias físicas, mentales, intelectuales o sensoriales y que al interactuar con distintos ambientes del entorno social pueden impedir su participación plena y efectiva en igualdad de condiciones a las demás”.

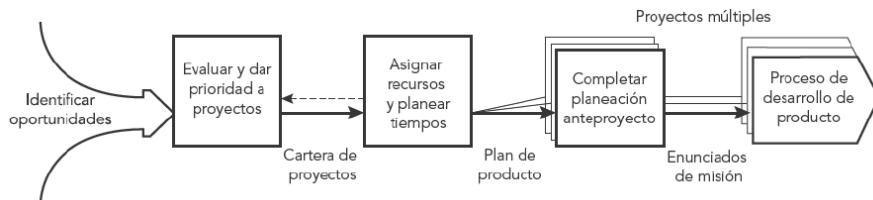


FIGURA 2.1: Proceso de planeación de un producto (Ulrich y Eppinger, 2012)

Al año 2010, las personas en México que tienen algún tipo de discapacidad son 5 millones 739 mil 270, lo que representa 5.1 % de la población total.

Una de las dificultades más importantes a nivel nacional es la de caminar o moverse. Que referencia a la dificultad de una persona para moverse, caminar, desplazarse o subir escaleras debido a la falta de toda o una parte de sus piernas; incluye también a quienes teniendo sus piernas no tienen movimiento o presentan restricciones para moverse, de tal forma que necesitan ayuda de otras persona, silla de ruedas u otro aparato, como andadera o pierna artificial.

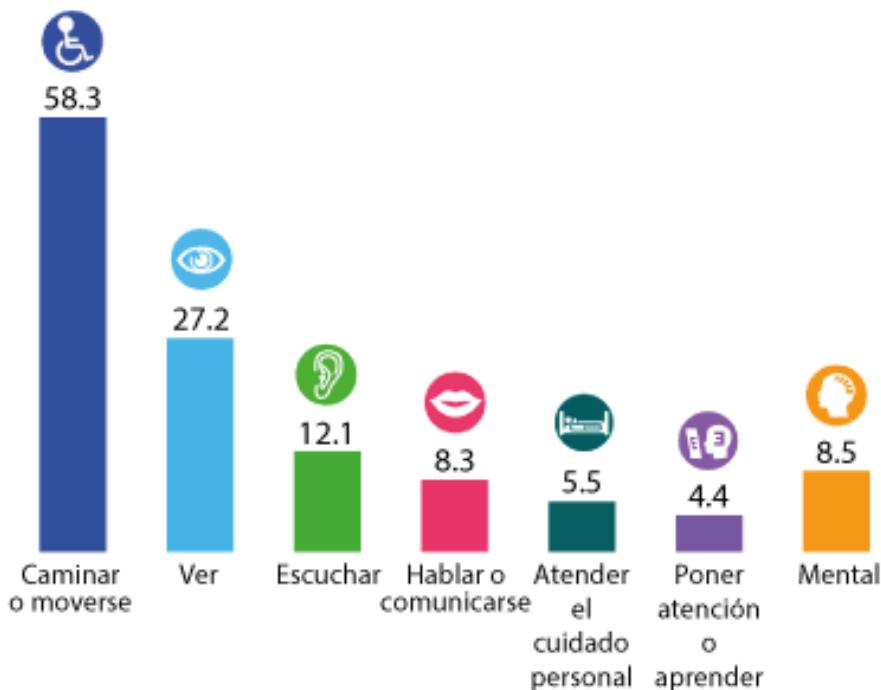


FIGURA 2.2: Porcentaje de la población con discapacidad según dificultad en la actividad (Año 2010) (INEGI, s.f.)

Algunos otros datos estadísticos sobre discapacidad en México que nos permitirán segmentar mejor el mercado para poder ofrecer un producto de valor para la población afectada por esta dificultad son:

- Las dificultades para caminar y para ver son las más reportadas entre las personas con discapacidad.
- Los principales detonantes de discapacidad en el país son las enfermedades (41.3 %) y la edad avanzada (33.1 %).
- 23.1 % de la población con discapacidad de 15 años y más no cuentan con algún nivel de escolaridad.
- De la población con discapacidad, 83.3 % es derechohabientes o está afiliada a servicios de salud.
- Participa en actividades económica 39.1 % de la población con discapacidad de 15 años y más, frente a 64.7 % de su contraparte sin discapacidad

## 2.2. **Modelo de negocio**

Para poder desarrollar el modelo de negocio para este producto nos basamos en el modelo de negocio Canvas desarrollado por Alexander Osterwalder y Yves Pigneur. El cual constituye una herramienta esencial para crear modelos de negocios, describiendo diferentes aspectos de la idea de negocio necesarios para el correcto funcionamiento de un proyecto.

La herramienta toma en cuenta distintos apartados interrelacionados que responden a cuestiones comunes como qué es lo que hacemos, cómo lo hacemos y a quién nos dirigimos, cubriendo así todos los aspectos básicos de un negocio: segmentos de clientes, propuesta de valor, canales, relación con el cliente, fuentes de ingresos, recursos clave, actividades clave, socios clave y estructura de costes.

A continuación se presenta el trabajo desarrollado para lograr la definición del modelo de negocio para la silla de ruedas motorizada.

### 1. Segmento de clientes

Personas con dificultad para caminar, con falta de toda o una parte de sus piernas ó adultos mayores con dificultades para caminar. Que se encuentren en un rango de edad de 5 a 80 años. Con ingresos económicos limitados.

### 2. Propuesta de valor

Es un producto que se puede instalar en la mayoría de las sillas convencionales, es de costo accesible, proporciona una experiencia más satisfactoria e incrementa los niveles de seguridad para el usuario.

### 3. Canales de distribución

La compra se puede realizar acudiendo directamente a los centros de venta, a través de los distribuidores o por internet, sin embargo para compras por internet deberá acudir al centro de venta para que se realice el montaje del producto.

### 4. Relación con el cliente

El medio masivo para promocionar el producto será a través de redes sociales y

la página web, adicional se buscarán alianzas con empresas que venden equipo medico para que ofrezcan también nuestro producto.

**5. Fuentes de ingreso**

Venta del módulo de asistencia motriz y servicios de instalación

**6. Recursos clave**

- Hardware: motor, batería, electrónica, accesorios de montaje.
- Centro de venta e instalación
- Técnicos de instalación del módulo

**7. Actividades clave**

Producción: Se comprometieron entregas periódicas de los insumos acorde a la demanda del mes siguiente y adicional se tiene un stock capaz de soportar el desabasto de componentes primarios del módulo de asistencia motriz por lo que se tendría hasta dos meses de producción asegurada.

**8. Tus socios clave**

Proveedores de batería, motor, sensores y electrónica.

## Capítulo 3

# Propuesta tecnológica

Dada la introducción correspondiente, en este capítulo se describe la propuesta tecnológica que compete a este proyecto, para esto se propone, en particular, articular una solución que se identifique en el área de las *smart wheelchair*

### 3.1. Silla de ruedas inteligente

Una silla de ruedas inteligente *smart* es cualquier silla auto propulsada que utiliza un sistema de control para aumentar o incluso reemplazar el control del usuario (Simpson, 2005). Su propósito es el de reducir o eliminar las acciones del usuario para conducir la silla. Usualmente, una silla de ruedas inteligente es controlada vía una computadora, tiene una colección de sensores y aplica técnicas de movilidad de la robótica, pero todo esto no es exclusivamente necesario. La interfaz puede consistir de un joystick tradicional de silla de ruedas, un dispositivo *sip-and-puff*<sup>1</sup>, o alguna pantalla sensible al tacto. Estas en particular difieren de cualquier otra silla de ruedas motorizada en el sentido en que, en estas últimas el usuario es quien controla la velocidad y dirección del vehículo por completo, en una *smart wheelchair* esta tarea es apoyada por el sistema de control de la misma.

Las sillas de ruedas inteligentes son diseñadas para una gran variedad de tipos de usuarios. Algunas son diseñadas para usuarios con deficiencias cognitivas, como la demencia, estas comúnmente son acondicionadas con sistemas y técnicas de evación de colisiones logrando que incluso aunque el usuario lo indique, estas no incurran en una situación de choque que pueda lastimar al usuario. Algunas otras se enfocan en servir a pacientes con severas discapacidades motoras, como la parálisis cerebral y/o la cuadriplejia y el roll de la silla de ruedas es el de interpretar pequeñas activaciones musculares como comandos de alto nivel y ejecutarlos. Estas sillas por lo general emplean técnicas de la inteligencia artificial, como la planeación de trayectorias.

### 3.2. Componentes

Como se muestra en la figura 3.1 se proponen los siguientes componentes para la composición final de la solución:

- Interfaz de usuario
- Sistema de control

---

<sup>1</sup>tecnología que mediante inhalaciones el usuario puede utilizar para indicar acciones

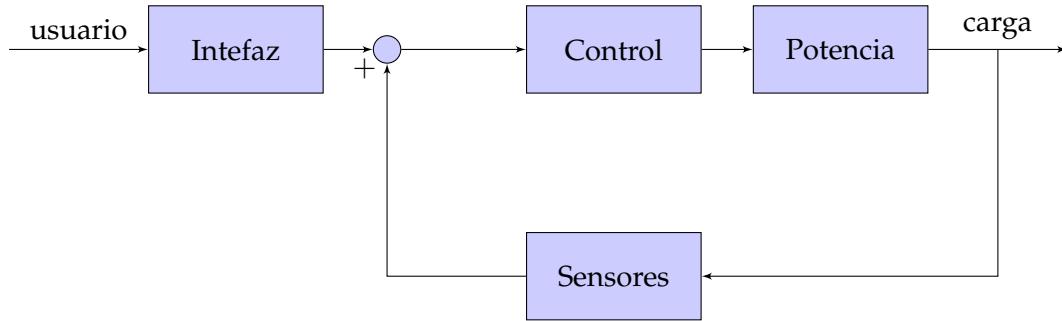


FIGURA 3.1: Definición esquemática de la solución

- Sistema de potencia
- Sensores

### 3.2.1. Esquema físico



FIGURA 3.2: Silla de ruedas tradicional y manual

Además de que, los componentes antes mencionados serán descritos a profundidad en las siguientes secciones, cabe aclarar que, como parte de la propuesta de solución, se plantea el hecho de que dichos sistemas serán integrados sobre una silla de ruedas tradicional. ref.3.2

Siendo así podemos catalogar en este momento a esta propuesta como un *upgrade* más que como un producto nuevo, aún así como es descrito en el capítulo 2 existe

una necesidad real en el mercado por una alternativa más sofisticada en sectores de la sociedad no tan favorecidos.

### 3.3. Interfáz de usuario



---

FIGURA 3.3: Joystick tradicional

En este apartado se opta por ir con un sistema tradicional, dado que según las observaciones del mercado que se hicieron en el capítulo 2, existe una gran demanda en el sector de los usuarios de sillas de ruedas con capacidad motriz para operar un *joystick* y aunado a la generosa oferta en el mercado de dispositivos de este estilo, esto es determinado.

### 3.4. Sistema de control

Se propone un sistema de control automático para la *silla smart* este tendrá las siguientes tareas:

- Procesar la señal proveniente del joystick de control
- Interpretar las distintas señales provenientes de los sensores
- Generar la salida adecuada para el sistema de potencia

Una de las consideraciones al momento de desarrollar dicho sistema de control es que: **el usuario final será quien dirija la silla de ruedas pero el sistema de control de la silla asistirá dicha conducción.**

Con lo anterior planteado el sistema de control propuesto tendrá una tarea bastante delimitada y se propone que resida en una computadora a bordo, el detalle de su implementación se discute en el siguiente capítulo.



FIGURA 3.4: Banco de baterias; 12v

## 3.5. Sistema de potencia

### 3.5.1. Almacenamiento

Para satisfacer a todo el sistema de energía se propone el uso de baterías eléctricas abordo. Dada la información expuesta en el capítulo 1 se elige el uso de las baterías que entregarán una mejor relación de densidad energética: las baterías de iones de litio. Dado que es un estándar en las sillas de ruedas motorizadas el uso de dos bancos de baterías de 12v cada una, en este caso se opta por seguir con dicha tendencia

### 3.5.2. Entrega de potencia



FIGURA 3.5: Par de motores de DC

Para la entrega de potencia a la silla se utilizarán un par de motores de corriente directa (fig.3.5) acoplados sobre un chasis debajo del asiento de la silla tradicional y directamente conectados a las ruedas estos contarán tambien con un par de encoders ópticos y el correspondiente controlador, mismos en los que se aunará en su descripción en el siguiente capítulo

### 3.6. Sensores

Con la intención de dotar al sistema de una retroalimentación que permita al usuario final una experiencia de conducción más rica y sencilla, se pretende incorporar en la solución distintos sensores, entre los que se encuentran, pero no exclusivamente:

- Sensores ultrasónicos
- Sensores de nivel de batería
- Acelerómetros
- Giroscópios
- Sensores de presión

La función principal de estos sensores es el de proveer al sistema de control de señales que permitan mejorar la experiencia de conducción resultante para el usuario. Además de este propósito también se encuentra el de agregar un nivel más de seguridad a la conducción, pues por ejemplo, los sensores ultrasónicos indicarán al sistema de un choque inminente y con esta información el sistema de control puede tomar la decisión de detener la silla.



## Capítulo 4

# Desarrollo e implementación

En este capítulo se describa la forma de implementación de la solución propuesta, así como también se describen, lo más detalladamente posible los métodos, técnicas y resoluciones aplicadas en dicha implementación.

### 4.1. Diseño estructural



---

FIGURA 4.1: Modelo de silla, base de solución

Como se mencionó en el capítulo anterior la propuesta indica que se ampliarán las características de una silla de rueda tradicional a las de una silla de ruedas *smart*, por lo que, como ya se indicó, la base del proyecto es como tal una silla de ruedas tradicional (fig.4.1). El modelo elegido corresponde al más comúnmente utilizado en nuestro mercado (ver cap. 2), los sistemas propuestos como parte de la solución serán físicamente acoplados a este modelo y la descripción de este procedimiento es detallada a lo largo de esta sección.

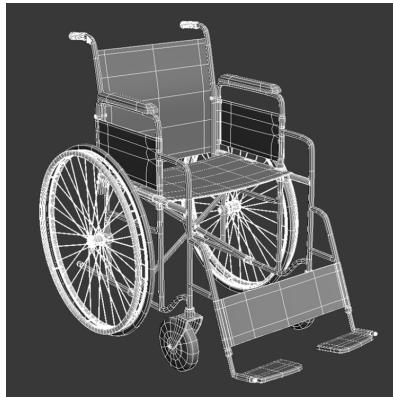


FIGURA 4.2: Vista lateral de silla



FIGURA 4.3: Interfaz de usuario incrustada en reposabrazos

#### 4.1.1. Joystick de interfaz

Este dispositivo, tiene una gran versatilidad, dada su construcción y que, de hecho es desarrollado con el propósito en mente de que sea integrado a una solución como la nuestra, tiene la preparación necesaria para montarlo en nuestro producto final. Según las observaciones registradas en la introducción (ref.1.3) la mejor posición para este aditamente es en el reposabrazos, por lo que se posicionará ahí viéndonos únicamente de un mecanismo de fijación mecánico (tornillo). Fig.4.3.

#### 4.1.2. Módulo de control

La composición detallada de este módulo se describe en secciones posteriores del presente, sin embargo las dimensiones y posicionamiento físico del mismo es tratada a continuación.

## Dimensiones

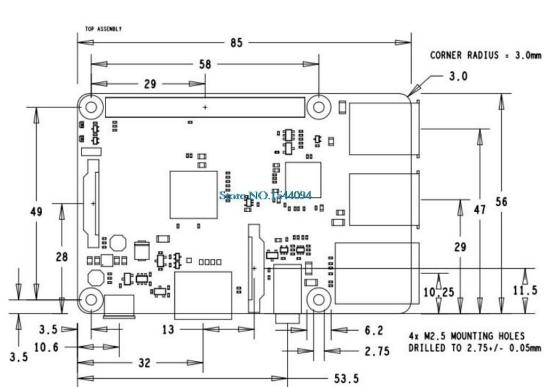


FIGURA 4.4: Raspberry pi: dimensiones

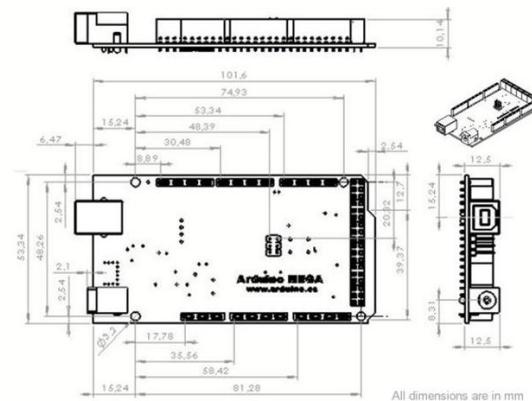


FIGURA 4.5: Arduino:  
dimensiones

Las dimensiones de los componentes principales de este subsistema son indicadas en la figura 4.4, por otro lado las dimensiones del controlador de motores son las siguientes:

**ancho** 76mm

**largo** 89mm

**profundidad** 46mm



FIGURA 4.6: Controlador de motores

Con los anteriores datos, se propone construir una carcasa plástica en la cual proteger y ubicar dichos componentes, las dimensiones del *enclosure* propuesto son las indicadas en la figura 4.7.

### Posicionamiento

El módulo de control será ubicado en la parte inferior del asiento de la silla, el case será empotrado mecánicamente sobre el sistema de almacenamiento de energía.

#### 4.1.3. Sistema de potencia

Como está indicado, este se compone tanto de 2 baterías (fig.3.4), como de los actuadores principales (fig.3.5), estos serán directamente montados en la parte baja de la silla de ruedas, justo donde se indica en la figura 4.8.

La transmisión de potencia será directa entre los motores y cada una de las ruedas posteriores de la silla, esta forma de transmisión ha demostrado ser una de las más eficientes, al mismo tiempo que permitirá una fabricación menos costosa de la solución final (Hobson, s.f.).

**ancho** 200mm  
**largo** 200mm  
**profundidad** 100mm



FIGURA 4.7: *Enclosure* del sistema de control



FIGURA 4.8: El sistema de potencia se ubica bajo el asiento

---

## 4.2. Hardware

El hardware que compone la solución:

- Raspberry pi 3 Model B+
- Arduino uno
- Controlador de motor Sabertooth Dual 60A
- Motor de DC, DG-158A, 2x
- Bateria UPG 12v 35AH, 2x
- Joystick Controller VR2
- Sensor ultrasónico, 2x
- Giroscópio y acelerómetro, MPU-6050 3 axis

### 4.2.1. Esquema de componentes

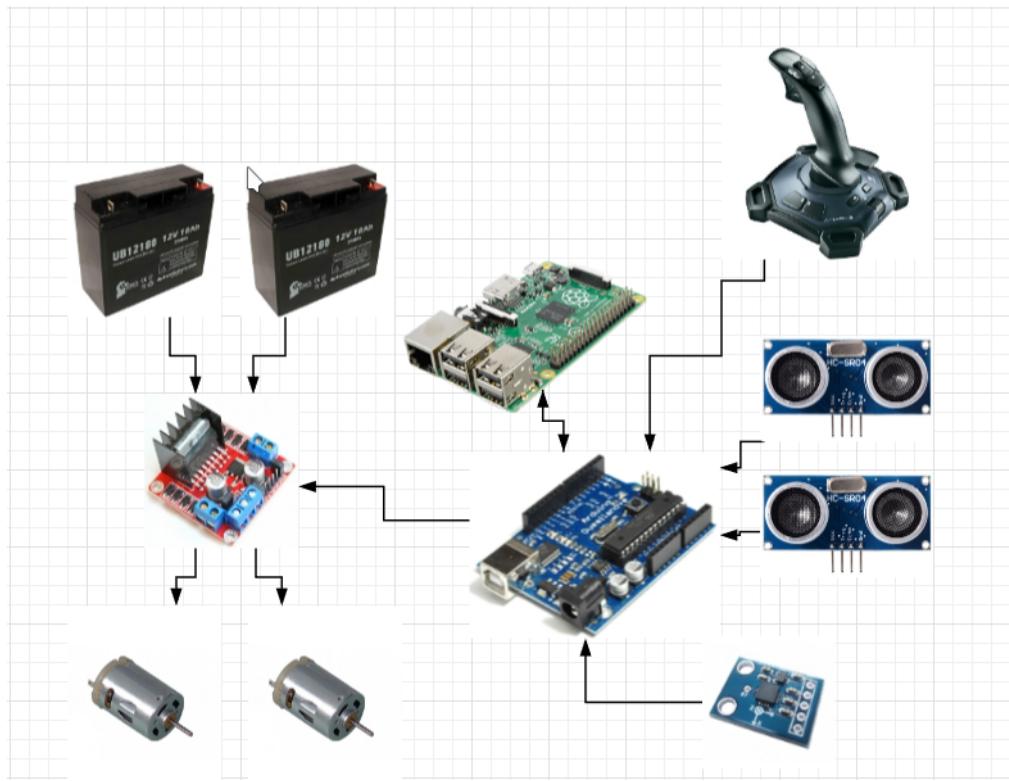


FIGURA 4.9: Diagrama esquemático de componentes

Los componentes de hardware estarán interconectados según se muestra en la figura 4.9.

### 4.3. Software

En la categoría de software, como parte de la propuesta de solución implica fabricar una silla de un costo accesible, se optará por el uso de tecnologías de uso libre así como de desarrollo hecho a la medida.

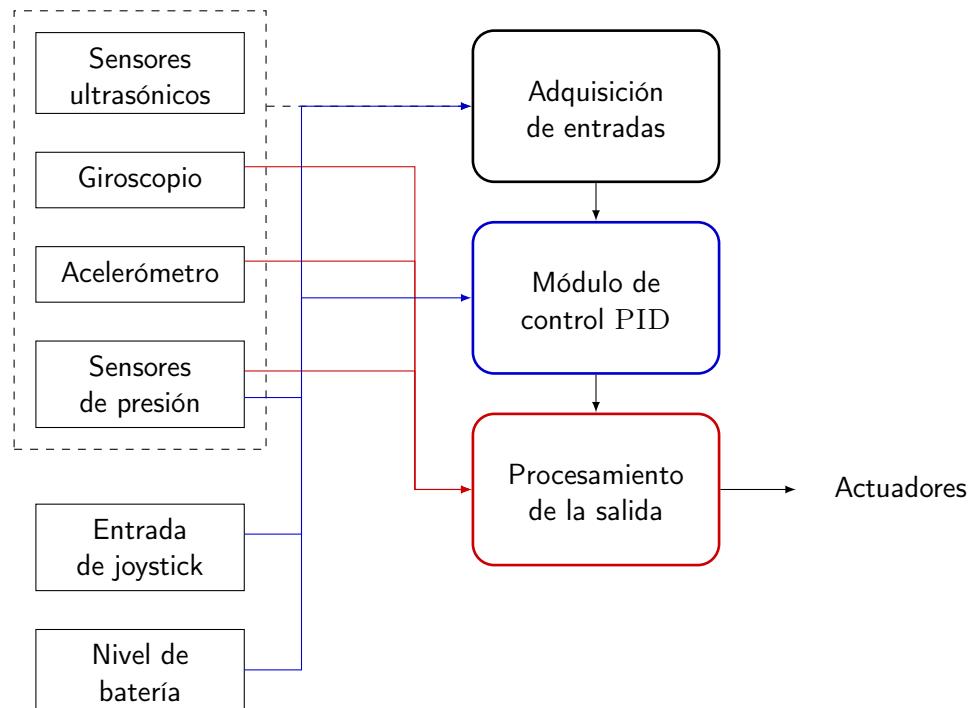


FIGURA 4.10: Componentes de software

Las funciones o módulos de software serán los siguientes:

- Módulo de adquisición de datos
- Algoritmo de control
- Entrega de resultados

Dichas funciones serán ejecutadas exclusivamente en dos componentes de hardware; arduino y raspberry y de manera más específica en el primero se obtendrán todas las entradas del sistema, al mismo modo que se entregarán las salidas a los actuadores (motores), y en el segundo se efectuará todo el procesamiento de la información, esto mediante un modelo de control PID.

## Capítulo 5

# Conclusiones

### 5.1. Resultados obtenidos

La investigación realizada para poder sentar las bases para el desarrollo de un producto como lo es la silla de ruedas motorizada nos deja reflexiones muy significativas. Por una parte el reconocimiento de la población discapacitada del país que hoy se encuentra con muchas dificultades para poder desenvolverse en la sociedad y que dadas las condiciones socioeconómicas, de desarrollo y de salud del país se ven potencializados los retos a los cuales esta población se tiene que enfrentar a fin de lograr calidad de vida y precisamente a este punto la relevancia de nuestra profesión como desarrolladores de tecnología al servicio de la patria.

La segunda reflexión es en el aspecto de nuestra formación, de la cual estamos completamente orgullosos y satisfechos pues como futuros egresados de la Facultad de Ingeniería y de la carrera de Ingeniería Mecatrónica hoy tenemos la capacidad de planificar, diseñar y desarrollar un producto integral que genere valor para la sociedad.

Los resultados obtenidos en este trabajo nos motivan a creer que tenemos la capacidad para desarrollar tecnología y soluciones ingenieriles cien por ciento mexicanas.



## Apéndice A

# Controlador PID para motores de DC

### A.1. Controlador PID

Fundamentalmente, los controladores PID están compuestos de tres acciones de control básicas. Estas son de simple implementación y proporcionan un buen rendimiento. Los proceso de ajuste de las ganancias de los controladores PID puede ser complejo porque es iterativo: primero, es necesario sintonizar el modo *Proporcional*, luego el *Integral*, y luego agregue el modo *Derivado* para estabilizar el sobreimpulso, luego agrega más *Proporcional*, y así sucesivamente. El PID controlador tiene la siguiente forma en el dominio de tiempo: Donde  $e(t)$  es el error del sistema (diferencia entre entrada de

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

referencia y la salida del sistema),  $u(t)$  el control variable,  $K_p$  la ganancia proporcional,  $K_i$  la ganancia integral, y  $K_d$  es la ganancia derivada. Cada coeficiente del PID controlador agrega algunas características especiales a la salida respuesta del sistema. Debido a esto, elegir el parámetros correctos se convierte en una decisión crucial para poner en práctica este controlador. Los efectos de estos parámetros en la respuesta de salida del sistema son que se muestra en la Tabla (2). Un controlador PID no conoce "la salida correcta para llevar el sistema al punto establecido mueve la salida en la dirección que debería mover el proceso hacia el punto de ajuste y necesita tener retroalimentación (mediciones) actuar.

La función objetivo principal que se selecciona para ser minimizado será considerado en este estudio:

*Minimize J, where*

$$\begin{aligned} J = & \alpha_1 (\text{Steady state error}) + \alpha_2 (\text{Rise time}) \\ & + \alpha_3 (\text{Maximum over shoot}) \\ & + \alpha_4 (\text{Settling time}) \end{aligned}$$

Where  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1$

Esta función objetivo  $J$  proporciona un punto de funcionamiento que en general es una transacción de los cuatro términos ponderados del Controlador PID según los valores de los pesos  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  y  $\alpha_4$ , donde  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  y  $\alpha_4$  están ponderando factores de los cuatro términos clave. (El-Gammal y El-Samahy, s.f.)

# Bibliografía

- Everest, Herbert A. y Harry C. Jennings (1937). «Folding wheel chair». En: *US Patent*.
- El-Gammal, Adel A. A. y Adel A. El-Samahy (s.f.). «A modified design of PID controller for DC motor». En: *Drives using particle swarm optimization PSO* (). URL: [https://u.tt/energy/papers/el\\_gammal/co\\_2.pdf](https://u.tt/energy/papers/el_gammal/co_2.pdf).
- Gorgues, J. (sep. de 2005). «Adaptación de sillas de ruedas convencionales». En: *Farmacia Práctica. Fichas de Ortopedia* 24.8.
- Hobson, Douglas (s.f.). «The anatomy of a powered wheelchair». En: *PERC on Wheeled Mobility* (). URL: [https://www.wheelchairnet.org/WCN\\_WCU/SlideLectures/DAH\\_AnatPoweredWCs-0699.pdf](https://www.wheelchairnet.org/WCN_WCU/SlideLectures/DAH_AnatPoweredWCs-0699.pdf).
- INEGI (s.f.). «Censo de Población y Vivienda 2010». En: *Cuestionario ampliado* (). URL: <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/discapacidad.aspx>.
- Koerth-Baker, Maggie (2012). «Who invented the Wheelchair». En: *Mental Floss Inc*. URL: <http://blogs.static.mentalfloss.com/blogs/archives/22329.html?cnn=yes>.
- msu.edu (2016). En: URL: <https://msu.edu/~luckie/segway/iBOT/iBOT.html>.
- Simpson, Richard C. (2005). «Smart Wheelchairs». En: *Rehabilitation Res. & Dev.* 42.
- Turner, A. (2003). «Principios, técnicas y práctica». En: *Terapia ocupacional y disfunción física* 5.
- Ulrich, Karl T. y Steven D. Eppinger (2012). «Planeació del producto». En: *Diseño y desarrollo de productos*.
- wheelchair-information.com (2017). «History of Wheelchair». En: URL: <http://www.wheelchair-information.com/history-of-wheelchairs.html>.
- Willard y Spackman (2005). «Terapia Ocupacional». En: *Editorial Médica Panamericana*.