



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN SISTEMA MECÁNICO DE PROPULSIÓN ASISTIDA PARA SILLAS DE RUEDAS MANUALES

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA

ING. MARIO ALBERTO PEÑALOZA VALDÉS

TUTOR ACADÉMICO

DR. JUAN CARLOS ÁVILA VILCHIS

TUTOR ADJUNTO

DR. JULIO CESAR DÍAZ MONTES

TOLUCA, MÉXICO

MARZO 2017

Índice general

Índice de figuras	7
Índice de tablas	11
Introducción	15
Antecedentes	15
Planteamiento del problema	16
Objetivo	16
Alcances y limitaciones	16
Metodología	17
Contenido del documento	18
1. Marco teórico	21
1.1. Historia de la silla de ruedas	21
1.2. Clasificación de sillas de ruedas	23
1.2.1. Sillas de ruedas manuales	24
1.2.2. Sillas de ruedas motorizadas	25
1.2.3. Sillas de ruedas especiales	27
1.3. Tipos de sillas de ruedas manuales	28
1.3.1. Estándar	28
1.3.2. Uso pesado	28
1.3.3. Bariátricas	29
1.3.4. Ligeras de alta resistencia	29
1.3.5. Ligeras	29
1.3.6. Ultraligeras	30
1.3.7. Sillas de ruedas deportivas	30
1.4. Distribución demográfica de usuarios de sillas de ruedas manuales	30
1.4.1. Principales grupos de usuarios	33

1.4.2. Perfil de usuarios	34
1.5. Método de propulsión convencional (MPC) de sillas de ruedas manuales	35
1.6. Lesiones más comunes causadas por MPC	38
1.6.1. Dolor en los hombros	39
1.6.2. Síndrome del túnel carpiano	40
1.7. Estado del arte y de la técnica	41
1.7.1. <i>Hub crank</i>	43
1.7.2. Propulsión por palancas	44
1.7.3. Propulsión mediante <i>handcycle</i>	48
1.8. Técnicas y metodologías de diseño	52
1.8.1. Diseño centrado en el usuario (DCU)	52
1.8.2. Generación de propuestas	53
1.8.3. Evaluación y selección de propuestas	54
1.8.4. Diseño asistido por computadora (CAD)	54
1.9. Conceptos utilizados en la fase de diseño de detalle	56
1.9.1. Palanca	56
1.9.2. Mecanismo y tipos de mecanismos	56
1.9.3. Mecanismo plano de cuatro barras	58
1.9.4. Principio del trabajo virtual	60
1.9.5. Transmisión por cadenas	61
2. Diseño conceptual	65
2.1. Enfoque DCU-QFD	65
2.1.1. Observación	66
2.1.2. Encuestas	66
2.1.3. Obtención de los requerimientos de diseño	69
2.1.4. Aplicación de la casa de la calidad y obtención de características técnicas de diseño	71
2.2. Generación de conceptos mediante herramientas TRIZ	73
2.2.1. Las nueve ventanas	74
2.2.2. Matriz de contradicciones y los 40 principios	75
2.3. Selección de conceptos	77
2.3.1. Matriz de decisión	78
2.3.2. Conceptos seleccionados	80

3. Diseño de detalle	85
3.1. Subsistema de cuatro barras	86
3.1.1. Síntesis dimensional	86
3.1.2. Análisis	90
3.1.3. Características del mecanismo de cuatro barras seleccionado	93
3.2. Subsistema de transmisión por cadena	96
3.3. Subsistema de frenos	99
3.4. Modelado CAD y simulaciones	100
3.4.1. Modelado CAD	101
3.4.2. Simulaciones	107
Conclusiones	111
Bibliografía	115
Apéndices	126
A. Cuestionario aplicado a los usuarios de sillas de ruedas encuestados	129
B. Matriz de contradicciones	135
C. Programa de síntesis y análisis hecho en Mathematica 9.0	137
D. Gráfico para la selección de cadenas Norma ISO 606 (Serie Europea)	161
E. Planos de dibujo	163

Índice de figuras

1.1. Primer silla de ruedas auto-propulsada [1].	22
1.2. Diagrama de clasificación general de sillas de ruedas [2].	24
1.3. Principales partes de una silla de ruedas manual [3].	25
1.4. Silla de ruedas con propulsión asistida [4].	26
1.5. Silla eléctrica [5].	26
1.6. <i>Scooter</i> eléctrico [6].	27
1.7. Silla de ruedas para nieve [7].	27
1.8. Silla de ruedas para nieve [7].	27
1.9. Silla de ruedas Invacare Tracer EX2 [8].	28
1.10. Silla de Kansas Wizz-ard [8].	28
1.11. Silla Regency XLC [8].	29
1.12. Silla Invacare action patriot [8].	29
1.13. Silla Sunrise Quickie Guardian 3000 [8].	29
1.14. Silla Quickie Ti Titanium [8].	30
1.15. Silla de ruedas de carreras [8].	30
1.16. Fase de propulsión [8].	37
1.17. Fase de recuperación [8].	37
1.18. Configuración del eje de la rueda [8].	38
1.19. Ángulo de la articulación del codo [8].	38
1.20. Ubicación del túnel carpiano en la mano [9].	40
1.21. Dispositivo de propulsión alternativo <i>hub crank</i> [10]	43
1.22. Mecanismo compuesto por palanca y trinquete [11].	45
1.23. Propulsión por palancas y elemento de fricción [12].	46
1.24. Silla de propulsión por palancas y sistema de engranes [13].	46
1.25. Dispositivo de palanca sin fase de recuperación [14].	47
1.26. Silla Quantum Runner [15].	48
1.27. Silla de ruedas con propulsión por <i>handcycle</i> [16]	49

1.28. Silla de ruedas con propulsión por <i>handcycle</i>	50
1.29. Diagrama de palanca.	56
1.30. Mecanismo de 4 barras [17].	58
1.31. Ángulo de transmisión de un mecanismo de cuatro barras [18].	59
1.32. Posiciones del mecanismo donde se tiene el ángulo de transmisión máximo y mínimo [18].	60
1.33. Ejemplos de sprockets [19].	62
1.34. Especificaciones dimensionales de los sprockets [19].	62
1.35. Cadena de rodillos [20].	63
1.36. Dimensiones importantes de una cadena [20].	64
2.1. Diagrama de funciones para una silla de ruedas.	73
2.2. Representación de las nueve ventanas para el sistema de propul- sión de una silla de ruedas.	74
2.3. Propuesta conceptual C16.	80
2.4. Propuesta conceptual C18.	80
2.5. Propuesta conceptual C19.	80
3.1. Diagrama del mecanismo de cuatro barras utilizado.	86
3.2. Diagrama cinemático del mecanismo de 4 barras simplificado.	87
3.3. Diagrama cinemático utilizado para el análisis.	91
3.4. Diagrama de dimensiones del mecanismo de cuatro barras.	94
3.5. Variación del ángulo de transmisión durante un ciclo del mecanismo.	94
3.6. Variación del torque generado.	95
3.7. Gráfica para el cálculo del coeficiente k_1 [21].	97
3.8. Maneta seleccionada [22].	100
3.9. Cáliper seleccionado [23].	100
3.10. Barra principal.	101
3.11. Palanca.	102
3.12. Barra conectora.	102
3.13. Rueda dentada de entrada (Piñón).	103
3.14. Rueda dentada de salida.	103
3.15. Elemento de acoplamiento.	104
3.16. Acoplamiento del dispositivo con la llanta.	104
3.17. Soporte de cálipers.	105
3.18. Montaje de los soportes para cáliper.	105
3.19. Dispositivo de propulsión ensamblado.	106

3.20. Silla de ruedas con el dispositivo de propulsión diseñado montado en cada lado.	106
3.21. Análisis en posición uno, cuando se tiene el ángulo de transmisión máximo.	108
3.22. Análisis en posición dos, cuando el piñon gira 60° después de la posición inicial.	109
3.23. Análisis en posición tres, cuando el piñon gira 280° después de la posición inicial.	109
3.24. Estimación del peso del dispositivo diseñado.	112

Índice de tablas

1.1. Porcentaje de la población con discapacidad en México [24].	32
1.2. Representación del brazo humano [25] y rango de movimientos para una persona común [26].	36
1.3. Características de diferentes mecanismos de propulsión, partes basadas en datos experimentales [10].	51
2.1. Jerarquización de características hechas por los usuarios.	69
2.2. Importancia de las características y porcentaje de importancia de las 6 más importantes	70
2.3. Casa de la calidad	72
2.4. Elementos y funciones básicas para una silla de ruedas.	73
2.5. Contradicciones técnicas utilizadas.	75
2.6. Tabla de evaluación de propuestas conceptuales.	79
2.7. Descripción, ventajas y desventajas del concepto 1 (C16).	81
2.8. Descripción, ventajas y desventajas del concepto 2 (C18).	82
2.9. Descripción, ventajas y desventajas del concepto 3 (C19).	83
3.1. Comparación del dispositivo diseñado con otros sistemas de propulsión por palancas.	113

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño conceptual y diseño de detalle de un mecanismo de propulsión alternativo para sillas de ruedas manuales, utilizando el diseño centrado en el usuario, el despliegue de la función de calidad y herramientas de TRIZ. Al utilizar estas técnicas fue posible incluir a los usuarios durante el proceso de diseño y obtener una propuesta innovadora que toma en cuenta las opiniones de los usuarios. Esto debido a que en las últimas décadas se ha identificado una alta incidencia de lesiones por esfuerzo repetitivo, asociadas al método de propulsión convencional de las sillas de ruedas; por ello es importante contar con métodos alternativos de propulsión para sillas de ruedas manuales.

Introducción

Antecedentes

La movilidad sobre ruedas es una necesidad para el creciente número de personas con problemas para caminar. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), cerca del 10% del total de la población mundial tiene alguna discapacidad, de ese porcentaje el 10% necesita sillas de ruedas [28].

Actualmente la silla de ruedas es uno de los dispositivos de asistencia esencial para las personas con problemas para caminar. Sin embargo, en los últimos años se ha identificado una incidencia, de entre el 40% al 60% de lesiones por esfuerzo repetitivo [29], en usuarios que se propulsan utilizando aros de asistencia en el exterior de las ruedas, conocido como método de propulsión convencional (MPC).

Se estima que un 90% del total de las sillas de ruedas utilizadas alrededor del mundo emplean el MPC; sin embargo, el esfuerzo físico requerido puede llevar a lesiones por esfuerzo repetitivo (RSI por sus siglas en inglés) en los brazos y, eventualmente, a discapacidades e impedimentos secundarios [29, 30]. Mayor discapacidad en individuos que dependen de una silla de ruedas, limitaría aún más su movilidad y disminuiría su capacidad para realizar actividad física, llevando a un estilo de vida sedentario y en consecuencia a tener un mayor riesgo para problemas cardiovasculares.

Las personas recurren al uso de estos dispositivos de asistencia debido a lesiones en la médula espinal, a alguna enfermedad o a edad avanzada, entre otras; proporcionándoles movilidad independiente, la posibilidad para estudiar, trabajar e incursionar en el sector productivo de la sociedad. Sin sillas de ruedas, la movilidad de los usuarios dentro y fuera de sus casas estaría limitada, lo cual disminuiría su calidad de vida.

Planteamiento del problema

Se plantea la necesidad de diseñar un sistema de propulsión asistida para sillas de ruedas manuales, con un enfoque centrado en el usuario. El diseño buscará que el sistema de propulsión solicite menos físicamente los miembros superiores, en comparación con el MPC, contando con una ventaja mecánica superior.

Por lo anterior, es importante diseñar dispositivos y métodos alternativos de propulsión, que tomen en cuenta las necesidades de los usuarios y que soliciten mecánicamente al usuario en una menor proporción, disminuyendo el esfuerzo necesario para impulsarse con el método de propulsión convencional.

Objetivo

Diseñar un mejor sistema mecánico de propulsión alternativo para sillas de ruedas manuales, con base en requerimientos de los usuarios.

Objetivos particulares

- Recabar información de las necesidades de los usuarios de sillas de ruedas manuales.
- Documentar técnicamente los diferentes dispositivos comerciales existentes en la actualidad.
- Generar diferentes opciones para un sistema de propulsión alternativo para sillas de ruedas manuales y seleccionar la mejor.
- Implementar la opción seleccionada que cumpla con los requerimientos a través de un sistema de diseño asistido por computadora (CAD).

Alcances y limitaciones

- El proyecto se enfoca en el diseño de un dispositivo puramente mecánico para propulsar una silla de ruedas manual de uso diario.
- El diseño se enfocará en usuarios adultos capaces de propulsarse por sí mismos.

- El proyecto solo llegará hasta la realización de un prototipo virtual y simulaciones, utilizando software de Diseño Asistido por Computadora.
- Se hará una propuesta sobre la selección y uso de materiales para la construcción de un primer prototipo.

Metodología

Al tratarse de una investigación para el diseño de un nuevo producto, se utilizan estrategias y técnicas siguiendo la siguiente metodología:

1. Mediante la consulta y análisis de información de los estudios que se han hecho hasta el momento sobre las consecuencias de la utilización del método de propulsión convencional y de las estrategias que se han propuesto para solucionarlas, se identificará la necesidad o problema.
2. Obtener los requerimientos de diseño. Recabando información acerca de las necesidades e inquietudes de los usuarios de sillas de ruedas manuales que son los clientes finales del producto que se diseñará, utilizando encuestas para la obtención de requerimientos del dispositivo, pertenecientes al enfoque del Diseño Centrado en el Usuario (DCU), se obtendrán los requerimientos de las personas encuestadas. Posteriormente se utilizará la técnica de Despliegue de Función de la Calidad (o QFD por sus siglas en inglés), para incluir los siguientes puntos:
 - Introducir de forma sistemática y estructurada las necesidades del usuario final o cliente en el proceso de diseño, utilizando la observación, además de encuestas y entrevistas con usuarios.
 - Relacionar los requerimientos del cliente con las especificaciones técnicas de diseño.
3. Diseñar conceptualmente. Se dan posibles soluciones o propuestas de diseño utilizando herramientas de TRIZ (Teoría de resolución inventiva de problemas), como idealidad, 9 ventanas, análisis sustancia campo, etc. Estas herramientas se emplearán para entender mejor el problema y para la generación de ideas innovadoras que incrementen el número de conceptos o propuestas de solución.

4. Evaluar. Los prototipos conceptuales se someten a un proceso de selección para determinar el que mejor satisfaga los requerimientos de diseño, se utiliza la matriz de la casa de la calidad, perteneciente a la técnica de QFD. Obtenidos los requerimientos más importantes de diseño y mediante una jerarquización basada en la información proporcionada por los usuarios, aplicando la matriz de calidad se expresarán los requerimientos en características técnicas con su respectiva importancia. Finalmente, con base en las características técnicas y su importancia, se evalúa cada uno de los conceptos mediante valores estimados que determinarán la mejor propuesta, la cual pasará a la fase de diseño de detalle.
5. Diseñar detalladamente. Una vez seleccionada la mejor propuesta, se continúa con el diseño detallado, obteniendo dimensiones mediante síntesis y análisis del mecanismo de la propuesta, así como diagramas de los elementos que la componen, tanto de manera individual como en conjunto. Finalmente se realiza el modelo en software CAD (Computer Aided Design) y se realizan simulaciones con el fin de verificar cuestiones geométricas y de funcionalidad que pudieran afectar en la fabricación. Además, mediante un análisis de elemento finito se comprueban características físicas como resistencia, deformaciones y esfuerzos, necesarias para determinar el posible material para el sistema propuesto.

Contenido del documento

A continuación se presenta la estructura del documento y se da una breve reseña de lo que trata cada apartado de la tesis.

Como inicio del documento se tiene el apartado de introducción, que da un preámbulo del contenido del documento, incluyendo el planteamiento del problema, los objetivos, los alcances y limitaciones y metodología del presente proyecto. En el capítulo 1 se encuentra el marco teórico, donde son presentados todos los conceptos, teoría e información necesaria para sustentar el proyecto. El desarrollo hecho durante la fase de diseño conceptual, el cual toma en cuenta las técnicas utilizadas para la generación, comparación y selección de la propuesta de diseño que se realiza en el proyecto, es presentado en el capítulo 2. El capítulo 3 presenta el diseño de detalle, donde se realizan todos los cálculos para determinar las dimensiones, presentando los dibujos de cada elemento y el conjunto de

todos. También son mostrados los análisis de fuerzas y esfuerzos necesarios para obtener las características necesarias para la selección de materiales. Al final del documento se presentan las conclusiones de este proyecto.

Capítulo 1

Marco teórico

1.1. Historia de la silla de ruedas

Se han encontrado antecedentes sobre sillas de ruedas desde tiempos remotos, desde imágenes en muros y vasijas griegas, hasta lozas de pizarra encontradas en China cuya antigüedad data del año VI A.C. [31]. Aproximadamente 3 siglos después, se tiene conocimiento de que en China surgieron las primeras carretillas con ruedas que eran utilizadas para transportar objetos pesados así como para trasladar personas lesionadas o incapacitadas. En el año 525 D.C. se comenzaron a observar en el arte chino las distintas características que tenían las carretillas utilizadas para transportar objetos pesados y las utilizadas para transportar personas que contaban con un asiento [31].

Fue hasta 1595 cuando un artista realizó un dibujo del aquel entonces Rey Español Felipe II (1527-1598), que sufría de gota, por lo cual se le fabricaron sillas especiales. En el dibujo se observa al rey sentado en una silla que contaba con pequeñas ruedas montadas en cada una de las patas, contaba también con plataformas para los pies [31], así como con un respaldo capaz de ajustarse. La silla utilizada por el Rey Felipe no era capaz de ser impulsada o propulsada por él mismo, por lo que necesitaba de otra persona para poder trasladarse con ella.

El primer registro de una silla propulsada por la misma persona que la utiliza, data de 1655. Cuando Stephen Farfler, un relojero parapléjico, fabricó una silla de tres ruedas, dos traseras y una delantera en la cual se encontraba montado un sistema de manivela en cada lado, con el propósito de hacer girar la rueda y propulsarse hacia adelante sin la ayuda de alguien más [31].



Figura 1.1: Primer silla de ruedas auto-propulsada [1].

Posteriormente en Inglaterra surgió una silla inventada por John Dawson, fue utilizada por personas discapacitadas para trasladarse a los balnearios. Esta silla fue llamada silla *Bath* y contaba con un mecanismo de manivela rígida con el cual era posible dirigirla, se construyó una variedad de tipos de estas sillas pero todas requerían de otra persona, o de un animal para ser empujadas o jaladas [31].

Debido al poco conocimiento de materiales, las primeras sillas de ruedas eran voluminosas y fueron construidas de materiales pesados como la madera, esto limitaba la movilidad de los usuarios. En el siglo XIX se logró reducir considerablemente el tamaño de las sillas de ruedas, en especial de las ruedas.

Fue en 1881 que los constructores de sillas de ruedas implementaron un segundo borde, con un diámetro menor al de las ruedas y que sobresalía un poco, actualmente llamados aros de asistencia. Esto evitaba que los usuarios tuvieran contacto directo con las ruedas con lo que se lograba que los usuarios mantuvieran sus manos limpias y evitaba cualquier tipo de lesión provocada por el contacto directo con ruedas al impulsarse. Se tienen registros de que la primera patente hecha sobre sillas de ruedas fue en 1869. Este documento mostraba un modelo bi-manual propulsado por medio de ruedas traseras, posteriormente aparecieron modelos nuevos con gran variedad de modificaciones [32].

Fue hasta 1933 que un ingeniero llamado Harry Jennings construyó una silla de ruedas de acero, con poco peso y plegable, para su amigo Herbert Everest quien había sufrido un accidente. Al descubrir el potencial del invento, formaron su propia compañía, esta fue llamada Everest & Jennings, con el objetivo de fabri-

car en grandes cantidades las nuevas sillas que dominarían el mercado por más de treinta años [32].

La primera silla de ruedas motorizada surgió en 1915, hecha por ingenieros británicos. Sin embargo las sillas de ruedas manuales disminuyeron su costo, por lo que la mayoría continuo utilizándolas a pesar de las desventajas que presentaban, como lo difícil que era transportarlas y guardarlas. Las primeras sillas de ruedas motorizadas utilizaban motores eléctricos, que mediante el uso de cintas en el rotor y en las ruedas era posible transmitir el torque producido a las ruedas. Las sillas motorizadas actuales utilizan un sistema de engranes que conectan el motor al eje de las ruedas, para así poder transmitir el torque que produce el giro en las ruedas. Esta forma de transmisión es más eficiente y requiere de menor mantenimiento [31].

Las primeras sillas de ruedas motorizadas fueron sillas de ruedas manuales convencionales, con la diferencia de que se les añadían elementos como baterías, motores y sistemas de engranes con diferentes configuraciones para poder propulsarlas [32].

El hecho de añadir un mayor número de elementos hacía que fueran voluminosas, pesadas y difíciles de manejar. Estos primeros modelos de sillas de ruedas motorizadas sólo utilizaban la energía de las baterías con el único propósito de hacer girar las ruedas de la silla. En la actualidad los modelos más recientes de éstas llegan a tener sistemas que utilizan la energía para el ajuste del asiento, el respaldo y los reposapiés. Debido a ésto llegan a ser sistemas muy complejos que requieren de personal altamente capacitado para realizar su mantenimiento.

1.2. Clasificación de sillas de ruedas

“Una silla de ruedas es el dispositivo de asistencia más utilizado alrededor del mundo el cual proporciona movilidad sobre ruedas a personas con problemas para caminar”[33].

Las diferentes necesidades entre los usuarios de sillas de ruedas, han llevado a los ingenieros y diseñadores a desarrollar diferentes tipos y modelos de estos dispositivos, para así poder satisfacerlas. La mayoría de sillas de ruedas puede

ser clasificada según el diagrama en la Figura 1.2, de las cuales este proyecto se enfoca en las sillas manuales de uso diario.



Figura 1.2: Diagrama de clasificación general de sillas de ruedas [2].

Las sillas de ruedas de uso temporal no requieren de un ajuste personalizado debido a que su uso no es prolongado. La calidad y resistencia suelen ser bajas, en general se utilizan materiales livianos para construirlas y son fáciles de transportar. Dentro de estas se encuentran las sillas de ruedas ortopédicas utilizadas en los hospitales para trasladar a los pacientes. Además, por el poco uso no se tienen efectos secundarios provocados por el sobreuso.

Las sillas de ruedas de uso diario son aquellas que utilizan las personas que han sufrido alguna lesión permanente que les impide utilizar las piernas para movilizarse. Éstas ya deben cumplir con ciertos estándares de calidad además de requerir de ajustes adecuados para el usuario, como lo es el apoyo postural y alivio de presión.

La evolución de las sillas de ruedas a través de los años ha presentado diferentes modelos y tipos de sillas de ruedas. Factores como: la necesidad de introducirlas en los automóviles; el desarrollo de programas de rehabilitación y reeducación de personas lesionadas; el mejoramiento de los servicios médicos; la demanda de independencia de personas discapacitadas y el surgimiento de los deportes en sillas de ruedas la han hecho evolucionar hasta la actualidad [34].

1.2.1. Sillas de ruedas manuales

Las sillas de ruedas manuales son aquellas que de alguna forma utilizan la fuerza física del usuario o de un asistente para desplazarse. Normalmente este

tipo de sillas de ruedas utiliza el método de propulsión convencional, que hace uso de los aros de asistencia para poder impulsarse hacia adelante y atrás, dependiendo de la cantidad de fuerza que el usuario sea capaz de aplicar. Es posible encontrar diferentes tipos o modelos, de los cuales se describen algunos en los siguientes apartados. En la Figura 1.3 se muestra un ejemplo de una silla de ruedas manual así como sus principales elementos.



Figura 1.3: Principales partes de una silla de ruedas manual [3].

1.2.2. Sillas de ruedas motorizadas

Las sillas de ruedas motorizadas no dependen de la fuerza que es capaz de producir el usuario. Utilizan otra fuente de energía, normalmente eléctrica, para poder mover la silla de ruedas y con ella al usuario. A continuación se presentan los tipos más comunes de estas.

Sistema de propulsión asistido

Este tipo de silla de ruedas tienen la estructura de una silla de ruedas manual con la diferencia que en los ejes de las llantas principales se tienen motores eléctricos que asisten a los usuarios para poder propulsarse una mayor distancia con menor fuerza. Éstas utilizan el método de propulsión convencional que utiliza los aros de asistencia para propulsarse. Hechas para personas con debilidad en los brazos, son ligeras y fáciles de transportar [2]. En la Figura 1.4 se muestra un ejemplo de este tipo de silla de ruedas.



Figura 1.4: Silla de ruedas con propulsión asistida [4].

Eléctricas

Estas sillas de ruedas utilizan motores eléctricos además de circuitos electrónicos y sistemas mecánicos para producir y controlar el movimiento, velocidad y aceleración de la silla de ruedas. Normalmente cuentan con dos motores y un sistema de control electrónico con distintas funciones como propulsar la silla de ruedas, configurar el asiento, respaldo y los reposapiés; incluso cuentan con funciones para que el usuario pueda alcanzar una postura erguida. Son de mayor tamaño comparadas con las manuales, difíciles de conducir para algunos usuarios y difíciles de transportar [2], un ejemplo de este tipo se muestra en la Figura 1.5.



Figura 1.5: Silla eléctrica [5].

Scooter

Los *scooters*, como el de la Figura 1.6, son dispositivos eléctricos de 3 o 4 ruedas que proporcionan movilidad a sus usuarios, su configuración es muy similar a la de las motocicletas. Son especialmente diseñados para personas con buena movilidad en los brazos y control en el tronco del cuerpo. Se conducen de manera similar a un automóvil. Si bien no son sillas de ruedas, los scooters representan una alternativa de movilidad utilizada por muchas personas con problemas para caminar [2].



Figura 1.6: Scooter eléctrico [6].

1.2.3. Sillas de ruedas especiales

Hay sillas de ruedas que son hechas para actividades especiales así como para poder ser utilizadas en distintas condiciones de terreno, más que un dispositivo de asistencia pueden considerarse como un dispositivo recreativo [7]. En las Figuras 1.7 y 1.8 se presentan dos de ellos.



Figura 1.7: Silla de ruedas para nieve [7].



Figura 1.8: Silla de ruedas para nieve [7].

1.3. Tipos de sillas de ruedas manuales

Las sillas de ruedas manuales son el tipo más utilizado alrededor del mundo por ventajas como: ser ligeras, de fácil mantenimiento y fáciles de transportar, entre otras. Es por ello que han ido evolucionando con el paso del tiempo, desarrollando dispositivos para hacerlas más aptas y cómodas para los usuarios. Existen distintos tipos de sillas de ruedas manuales, que varían principalmente dependiendo de la calidad de sus materiales y de características como el peso o tamaño, así como del uso para las cuales son destinadas [8]. A continuación se describen algunos modelos pertenecientes a este tipo de sillas de ruedas.

1.3.1. Estándar

Este tipo de silla de ruedas generalmente tiene una masa mayor a 16 kg, no cuenta con características ajustables, sus dimensiones son limitadas y su uso se limita principalmente a interiores [8]. Un ejemplo de este tipo de silla se muestra en la Figura 1.9.



Figura 1.9: Silla de ruedas Inva-care Tracer EX2 [8].

1.3.2. Uso pesado

Son sillas de ruedas especializadas para personas con una masa mayor a 110 kg, están hechas para realizar actividades pesadas. Son construidas con materiales más resistentes a los comunes, lo cual aumenta su costo [8]. Un ejemplo de este tipo de silla se muestra en la Figura 1.10.



Figura 1.10: Silla de Kanzas Wizz-ard [8].

1.3.3. Bariátricas

El grado de especialización de este tipo de sillas es mayor, son hechas para personas que sufren de obesidad, de entre 160 kg hasta más de 450 kg. Son de gran tamaño y la mayoría de usuarios necesita de asistencia de otras personas para poder empujar la silla [8]. Un ejemplo de este tipo de silla se muestra en la Figura 1.11.



Figura 1.11: Silla Regency XLC [8].

1.3.4. Ligeras de alta resistencia

Diseñadas para personas que realizan poca actividad física, su uso es de largo plazo y cuentan con una masa ligeramente menor a 16 kg. Cuentan con más variedad de tamaños, no obstante su capacidad para ajustarse es limitada [8]. Un ejemplo de este tipo de silla se muestra en la Figura 1.12.



Figura 1.12: Silla Invacare action patriot [8].

1.3.5. Ligeras

Con una masa aproximada de entre 15 y 16 kg, están dirigidas a personas que no son capaces de propulsarse en una silla de ruedas estándar. Cuentan con gran adaptabilidad y su uso es de corto plazo [8]. Un ejemplo de este tipo de silla se muestra en la Figura 1.13.



Figura 1.13: Silla Sunrise Quicke Guardian 3000 [8].

1.3.6. Ultraligeras

Con una masa de entre 9 y 10 kg, ajustables en la mayoría de sus características, pueden ser rígidas o plegables y normalmente son utilizadas tiempo completo por usuarios activos. Utilizan aleaciones de alta tecnología haciéndolas más ligeras, lo que aumenta su resistencia así como su costo [8]. Un ejemplo de este tipo de silla se muestra en la Figura 1.14.



Figura 1.14: Silla Quickie Ti Titanium [8].

1.3.7. Sillas de ruedas deportivas

Este tipo de silla de ruedas fue desarrollado para los atletas con capacidades diferentes, con el objetivo de proporcionarles la mejor silla de ruedas y mejorar en cada uno de los deportes en los que se utilizan. Suelen tener una estructura ligera pero resistente debido a que se utilizan materiales compuestos. Son sólidas, por lo que no tienen la capacidad de plegarse, lo que dificulta su transporte; además, mejoran la estabilidad cuando se alcanzan grandes velocidades y al hacer giros bruscos [7]. Un ejemplo de este tipo de silla se muestra en la Figura 1.15.



Figura 1.15: Silla de ruedas de carreras [8].

1.4. Distribución demográfica de usuarios de sillas de ruedas manuales

A través de los años el concepto de discapacidad ha ido cambiando y ya no se centra en cuestiones médicas, biológicas o físicas, donde patologías, enfermedades y deficiencias físicas eran lo principal. Hoy en día se tiene un concepto más amplio que involucra diversos factores, no solo propios de la persona si no tam-

bién del entorno que la rodea, incluyendo aspectos culturales, sociales, familiares, etc. Dicho de manera más simple, una persona discapacitada no solo es aquella que presenta un problema físico o padece alguna enfermedad, en un aspecto más amplio una persona con discapacidad es aquella que no es capaz de realizar sus actividades cotidianas debido no solo a su condición de salud sino también a las condiciones de su entorno, ya sean físicas o de actitudes [24].

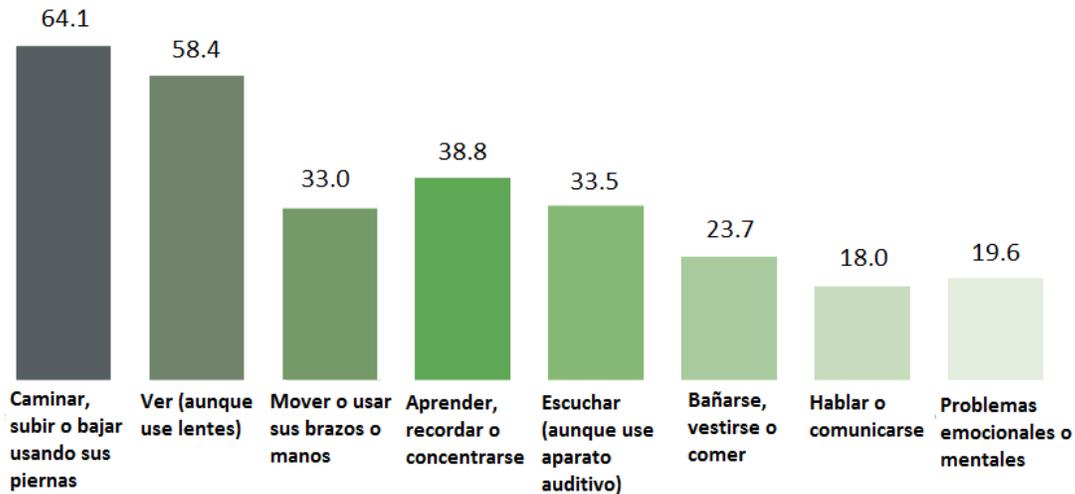
En la actualidad para poder determinar estadísticas acerca de discapacidad, se trata de obtener la dificultad que las personas tienen para realizar ciertas tareas consideradas como básicas, como lo es: ver, escuchar, poner atención, caminar, etc. Esto considerando la dificultad para realizar una tarea desde una perspectiva que incluye problemas físicos o de salud, así como la influencia de su entorno, mientras que anteriormente solo se preguntaba si se tenía algún problema físico o enfermedad [24]. Como ejemplo se encuentra la dificultad para caminar, que puede ser debida a algún problema físico así como también puede ser causada por una mala infraestructura en el área donde se vive. Esto ha llevado a cambios importantes en la obtención de datos acerca de discapacidad en todo el mundo. En base a esta nueva concepción de la discapacidad, se han estado realizando encuestas para conocer la situación demográfica de las personas con discapacidad en México.

En el 2015 se dieron a conocer estadísticas sobre la discapacidad en el país mediante un informe realizado por el INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). De acuerdo con la encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica realizada en el 2014, la población mexicana se compone de cerca de 120 millones de personas. De ellos, cerca de 7.2 millones reportaron tener gran dificultad para realizar alguna de las actividades básicas por lo que se consideran personas con discapacidad, aproximadamente 15.9 millones reportaron tener poca o media dificultad para poder hacer las mismas actividades, mientras que los restantes 96.6 millones de personas no reportaron dificultad alguna para realizar dichas actividades [24].

Con esta información es posible determinar que en México se tiene una prevalencia de personas con algún tipo de discapacidad del 6% del total de la población. Dentro de este porcentaje se encuentran diferentes categorías según los problemas físicos o de salud de las personas, así como la dificultad que tienen

para desempeñar alguna tarea. En la Tabla 1.1 se muestran los porcentajes y las distintas discapacidades que se reportaron por el INEGI [24].

Tabla 1.1: Porcentaje de la población con discapacidad en México [24].



•Nota: la suma de los porcentajes es mayor a 100% debido a que las personas reportaban tener diferentes discapacidades a la vez.

En México las personas con problemas para caminar y subir o bajar escalones utilizando sus piernas, son las de mayor presencia. Se reportó que de ellas, las tres principales causas de la discapacidad son: enfermedades como primer lugar, seguido por la edad avanzada y finalmente por accidente. Así mismo la dificultad para ver y la dificultad para aprender, recordar y concentrarse, se encuentran en segundo y tercer lugar de porcentaje, respectivamente.

De acuerdo con lo anterior, el número de personas con dificultad para caminar es una cantidad considerable, y no solo en el país. Según la OMS (Organización Mundial de la Salud) alrededor del 10% del total de la población mundial tiene algún tipo de discapacidad, de ellos el 10% requiere de una silla de ruedas, de las cuales cerca de un 30% no cuentan con una. El porcentaje continua disminuyendo si consideramos que de los que sí tienen acceso a una silla de ruedas, muy pocas cuentan con una silla de ruedas apropiada, la cual es definida por la misma OMS como silla de ruedas que satisface las necesidades del usuario y las condiciones ambientales; que ofrece ajuste y apoyo postural correctos; que es segura y dura-

ble; está disponible en el país; y se puede obtener y mantener en el país, junto con servicios sustentables, al precio más económico y alcanzable [33].

La mayoría de las personas que utiliza sillas de ruedas emplea las de tipo manual, debido a que son las de mayor acceso a nivel mundial, además, de las ventajas que tienen y su relativo bajo costo y mantenimiento. Los usuarios de este tipo de sillas de ruedas son personas con problemas para caminar ya sea que se propulsen por sí mismos o que recurran a la asistencia de otra persona para poder impulsarse.

1.4.1. Principales grupos de usuarios

Como se mencionó anteriormente la dificultad para caminar es la discapacidad de mayor presencia entre los mexicanos. Por ello es importante conocer las diversas causas por las que las personas adquieren esta discapacidad y recurren al uso de las sillas de ruedas. A continuación se describen los principales grupos de usuarios.

1. Lesiones en la médula espinal [35]

Las principales causas de las lesiones en la médula espinal son los accidentes, ya sean automovilísticos, caídas o lesiones deportivas. Las lesiones en la médula espinal producen problemas en el sistema nervioso, provocando inmovilidad en extremidades como los brazos y piernas. Dependiendo del lugar de la lesión en la médula espinal se puede considerar como paraplejía o cuadraplejía.

Paraplejía: Cuando se tiene daño entre las vértebras ubicadas debajo del cuello, lo cual causa parálisis de ambas piernas.

Cuadriplejía (también llamada tetraplejía): Cuando el daño en la médula espinal es en la base del cráneo o cuello, como consecuencia se tiene parálisis de las dos piernas y los dos brazos. Dependiendo del nivel de la lesión, las personas con esta condición pueden llegar a tener movilidad en las manos.

Estas dos condiciones físicas, también pueden ser causadas por enfermedades del sistema nervioso [35]. Por ejemplo: esclerosis múltiple y esclerosis lateral amiotrófica (Enfermedad de Lou Gehrig).

2. Personas mayores y personas con debilidad en la parte baja del cuerpo con riesgo de caer

Gran parte de las personas mayores (60 a 100 años) pierden o disminuyen su capacidad para poder moverse por sí mismas, ya sea debido a otras enfermedades o tan solo a la degradación progresiva causada por la edad.

Existen otras enfermedades que causan debilidad en la parte inferior del cuerpo y por lo tanto llevan al uso de las sillas de ruedas manuales. Por ejemplo: La distrofia muscular que es la degradación progresiva de los músculos del cuerpo.

La esclerosis múltiple es causada por el daño a la vaina de mielina, la cubierta protectora que rodea las neuronas. Cuando esta cubierta de los nervios se daña, los impulsos nerviosos disminuyen o se detienen.

3. Para rehabilitación y traslado en los hospitales

Se utilizan sillas de ruedas en los hospitales para poder trasladar a los pacientes de un lugar a otro dentro del mismo establecimiento, así como también para aquellos que sufren alguna lesión que les impide poder caminar temporalmente.

1.4.2. Perfil de usuarios

El nuevo sistema mecánico de propulsión que se propone en este proyecto es para aquellos usuarios activos, aquellas personas que utilizan diariamente su silla de ruedas, dependiendo de ella para poder realizar sus actividades diarias como ir al trabajo, realizar actividades en sus casas y trasladarse de un lugar a otro. Son personas independientes, es decir, no necesitan de la asistencia de otra persona para poder impulsarse y desplazarse en su silla de ruedas. Esto les lleva a tener que usar constantemente sus brazos para poder mover la silla de ruedas a través del MPC.

Con la definición del perfil de usuarios, las personas que mejor encajan en él son las personas con paraplejía, ya que cuentan con buena movilidad en las extremidades superiores. Sin embargo, su uso no se limitaría a personas con paraplejía, pudiendo ser utilizado por otros grupos de usuarios que cuenten con movilidad en la parte superior del cuerpo.

1.5. Método de propulsión convencional (MPC) de sillas de ruedas manuales

El MPC para sillas de ruedas es el más utilizado hoy en día en los distintos tipos y modelos de sillas de ruedas manuales. Para poder entender mejor el MPC es necesario saber acerca del movimiento de las extremidades superiores así como de las articulaciones que las componen, ya que a través de estas se produce y transmite la fuerza generada hacia el aro de asistencia de la silla de ruedas.

El brazo humano, desde una perspectiva mecánica es considerado como un mecanismo capaz de adaptarse a un gran número de posiciones. Se compone principalmente de dos articulaciones, la del hombro y la del codo, ya que la muñeca se considera dentro del mecanismo de movimiento de la mano.

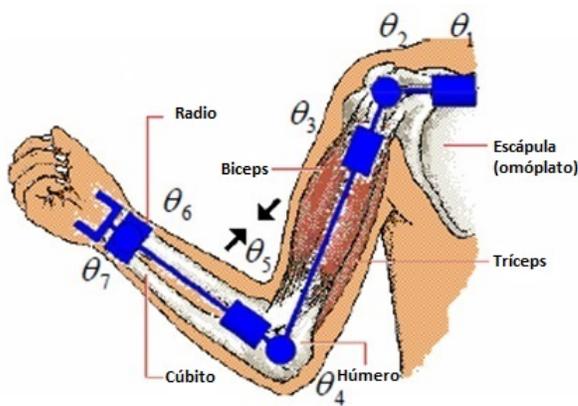
El hombro está formado principalmente por dos huesos, el húmero y el omóplato, estos se encuentran unidos mediante ligamentos (tiras de tejido fuerte fibroso) y tendones que a su vez los conectan a los músculos que rodean la articulación. Los principales tendones son llamados bíceps, que conecta con el músculo bíceps y supraspina, que favorece la formación de músculo giratorio en la articulación.

Es posible emular gran parte de los movimientos del hombro mediante la utilización de 3 grados de libertad (GDL), permitiendo el giro en tres direcciones diferentes alrededor de la articulación [25]. Por otra parte, la articulación del codo es la unión del otro extremo del húmero con los huesos del cúbito y radio, ubicados en el antebrazo. Los movimientos de esta articulación son posibles de emular mediante 2 GDL, que permitan la flexión y el giro capaz de ser realizados por el codo [25].

La articulación de la muñeca, es la unión de los huesos del antebrazo, el cúbito y el radio con la mano mediante el carpo. Esta articulación se encuentra unida por diversos ligamentos, los cuales permiten realizar movimientos de flexión y extensión, así como el movimiento de cierto ángulo en un plano paralelo a la palma de la mano llamado desviación radial y cubital. Son necesarios dos GDL para poder reproducir los movimientos que la articulación de la muñeca es capaz de realizar [25].

Tomando en cuenta los grados de libertad por cada una de las articulaciones del brazo, se necesita un total de siete GDL para simular el movimiento de un brazo humano. En la Tabla 1.2 se tiene la representación del brazo humano y el rango de movimientos para cada una de las articulaciones que lo componen.

Tabla 1.2: Representación del brazo humano [25] y rango de movimientos para una persona común [26].



	Rangos de movimiento humano estándar (°)	θ
Hombro	-180 a 50	θ_1
	-90 a 90	θ_2
	-90 a 0	θ_3
Codo	-145 a 0	θ_4
	-90 a 90	θ_5
Muñeca	-55 a 25	θ_6
	-70 a 90	θ_7

Sabiendo como funciona el brazo es posible definir el MPC. Este movimiento consiste en utilizar las manos, sujetando la rueda o el aro de asistencia y utilizando la fuerza de los brazos del usuario se hacen girar las ruedas desde un ángulo inicial (AP), hasta un ángulo final (AR). El movimiento realizado cuando se propulsa una silla de ruedas mediante el MPC se compone de las siguientes dos fases [2]:

Fase de propulsión (Figura 1.16). Esta fase comienza cuando el usuario entra en contacto con el aro de asistencia para aplicar la fuerza, poder impulsarse y termina al soltar el aro.

Fase de recuperación (Figura 1.17). Comienza al terminar el contacto de la mano del usuario con el aro de asistencia para poder regresar a la posición inicial y poderse propulsar nuevamente.

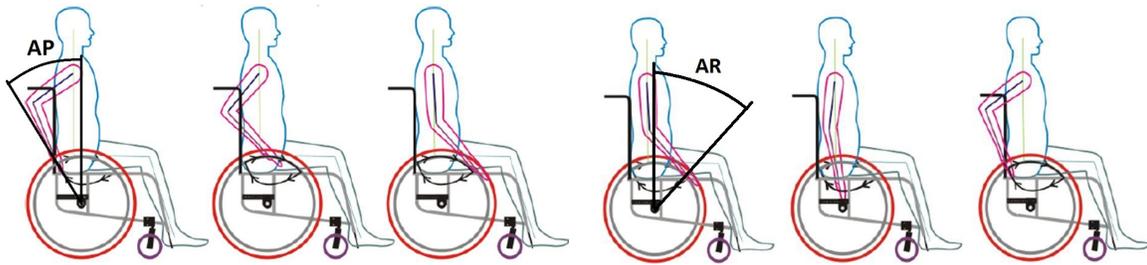


Figura 1.16: Fase de propulsión [8].

Figura 1.17: Fase de recuperación [8].

Estudios cinemáticos, cinéticos y biomecánicos [29, 36, 37, 38], han dado una perspectiva clara sobre el MPC para un mejor entendimiento del mismo, detectando factores como:

- Patrones o técnicas de propulsión [39].
- Configuración del asiento [40].

Se ha identificado la influencia de estos factores en la frecuencia y eficiencia de la fuerza durante el movimiento, disminuyendo o aumentando así la demanda física de las extremidades superiores. Siendo el patrón de propulsión semicircular el más eficiente, es utilizado en pruebas de velocidad por deportistas en sillas de ruedas, ya que disminuye la frecuencia y la fuerza requerida [39]. Por otra parte, se encontró que la configuración del asiento con el eje de las ruedas principales adelantado de 3 a 15 cm con respecto a la línea vertical del respaldo (Figura 1.18) y con la articulación del codo formando un ángulo de entre 100° y 120° sujetando el aro de propulsión exactamente por encima del eje, como se muestra en la Figura 1.19, es la configuración óptima [40].

La experiencia del usuario también puede ser considerada un factor, ya que usuarios principiantes en el uso de sillas de ruedas manuales suelen impulsarse con más fuerza de la necesaria y suelen utilizar técnicas de propulsión ineficientes. En los estudios realizados por Groot [41, 42], se capacita a usuarios de sillas de ruedas manuales durante un tiempo determinado. Se encontró que después del período de capacitación la eficiencia de la fuerza que se proporciona aumentó, mejorando la técnica de propulsión y con ello disminuyendo el riesgo de lesiones.



Figura 1.18: Configuración del eje de la rueda [8].



Figura 1.19: Ángulo de la articulación del codo [8].

1.6. Lesiones más comunes causadas por MPC

En las últimas décadas el MPC de sillas de ruedas se ha ligado a la incidencia de lesiones por esfuerzo repetitivo o RSI (por sus siglas en inglés), se han realizado estudios para entender mejor esta relación [29, 36, 37, 38]. Para ello se recurrió a la ergonomía, que es la disciplina cuyo objetivo es la búsqueda de la mejor relación posible entre los siguientes elementos, el humano, la máquina y el ambiente, realizando diseños de herramientas, tareas y lugares, para que se adapten a las características de las personas, estableciendo y desarrollando métodos de estudio de la persona, la técnica y de la organización.

El estudio ergonómico realizado en [43] establece claramente que la fuerza, la repetición o cadencia de alguna actividad y las posturas son los principales factores de patologías y enfermedades musculoesqueléticas. Sabiendo esto no es de sorprender la alta incidencia de lesiones en usuarios de sillas de ruedas manuales, debido a las fuerzas y cadencia asociada con el método de propulsión convencional. Se han desarrollado dispositivos como la SMARTWheel [44] capaz de medir las fuerzas y torques en las tres direcciones principales que se producen durante el movimiento de propulsión. Además, se han propuesto distintos modelos matemáticos [45, 46] para el análisis y entendimiento de la interacción hombre-máquina durante el MPC, teniendo buenas aproximaciones en la predicción de las fuerzas.

En los estudios realizados por Boninger y Ballinger [9, 47], usuarios activos de sillas de ruedas manuales muestran una incidencia de entre el 40% y 70% para dolor de hombros y de entre 49% y 73% para Síndrome de Túnel Carpiano (disfunción nerviosa en la parte media de los brazos), con un aumento en la incidencia mientras mayor sea el tiempo de uso y sin establecer un periodo definido después del cual surgen los problemas. Esto se debe tomar en cuenta debido a que no solo afecta fisiológicamente al usuario, sino que también tiene repercusiones sociales y psicológicas, produciendo cambios en el estado de ánimo, aislamiento social y pérdida de independencia, que en determinado momento llega a afectar a personas a su alrededor como familia y amigos.

1.6.1. Dolor en los hombros

El llamado "Síndrome de sobreuso", ha sido descrito como una causa potencial del dolor en los hombros en usuarios de sillas de ruedas manuales [48]. Se ha identificado previamente una relación entre cargas repetitivas durante actividades ocupacionales y lesiones musculoesqueléticas. Teniendo a consideración que una actividad se considera repetitiva, cuando se involucra flexión, extensión, abducción o rotación cíclica de la articulación [43]. El MPC no es una actividad ocupacional, sin embargo encaja claramente en la definición.

Los efectos de realizar una actividad repetitiva pueden ser magnificados cuando se combinan con posiciones incómodas o cargas en la extremidad superior tal y como sucede durante el MPC. Los estudios realizados sobre el método de propulsión de sillas de ruedas pronto coincidieron en el cálculo de las fuerzas que se producen durante la propulsión.

Con el objetivo de examinar esta relación entre las fuerzas y momentos producidos durante la propulsión con patologías en los hombros se han realizado estudios como [29], en el que se recolectó información de 33 participantes con paraplejía. Los participantes se propulsaron en sus sillas de ruedas a dos diferentes velocidades (0.9 y 1.8 m/s), las fuerzas y momentos en la articulación se calcularon utilizando el método de dinámica inversa, las patologías del hombro se evaluaron utilizando un examen físico y resonancias magnéticas. Se encontró que las personas que experimentaron mayores fuerzas posteriores, laterales o momentos de extensión durante la propulsión tuvieron mayor probabilidad de presentar

edema del ligamento coracoacromial, que es uno de los ligamentos más importante en la articulación del hombro. Individuos quienes experimentaron mayores fuerzas laterales y momentos de abducción, tuvieron mayor probabilidad de presentar adelgazamiento del ligamento coracoacromial. Finalmente, las fuerzas superiores y momentos de rotación interna, se asociaron con incremento de síntomas de patología en los hombros durante el examen físico. Al final del estudio, se indicó la necesidad de reducir las fuerzas requeridas para propulsar una silla de ruedas para poder preservar la integridad de las extremidades superiores.

1.6.2. Síndrome del túnel carpiano

El síndrome del túnel carpiano (CTS por sus siglas en inglés), se produce cuando el nervio mediano, que va desde el antebrazo hacia la mano, se comprime o se aprieta en la muñeca (Figura 1.20).

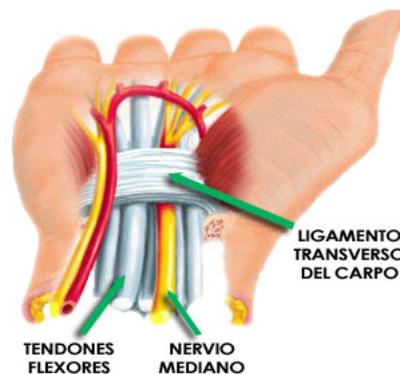


Figura 1.20: Ubicación del túnel carpiano en la mano [9].

El nervio mediano es el encargado del control de la sensibilidad en la parte palmar de los dedos, excluyendo el dedo meñique, además de controlar los músculos que se encuentran en las manos, por lo que permite el movimiento de todos los dedos. El túnel carpiano es un canal formado de hueso y ligamentos, ubicado en la muñeca, por el cual pasa la mayoría de nervios y tendones conectados a la mano. En ocasiones la irritación o inflamación de los tendones que pasan por el túnel produce presión en el nervio medio y como resultado puede producir entumecimiento y dolor en la muñeca y mano, y en casos graves llega a causar pérdida de sensibilidad y/o movimiento.

El síndrome del túnel carpiano es la afección más común y de la que mayor se tiene conocimiento dentro de las neuropatías por atrapamiento, en las cuales se tiene compresión o traumatismo en los nervios [49].

Se han hecho estudios como [50] en el que participaron 54 personas sin alguna enfermedad progresiva y que utilizaran sillas de ruedas manuales como principal forma de movilidad. Se observaron las características de los nervios medios del brazo antes y después de propulsarse arduamente durante 15 minutos en silla de ruedas para relacionar la incidencia de esta afección en los usuarios. Se obtuvieron imágenes de ultrasonido en tres niveles de la muñeca antes y después de propulsarse. Los resultados obtenidos no mostraron diferencias significativas. Sin embargo, se observaron algunas respuestas del sistema nervioso medio del brazo debido al MPC que son asociadas con síntomas del CTS. Se recomendó futura investigación en cómo el MPC afecta la respuesta del sistema medio del brazo.

1.7. Estado del arte y de la técnica

Con el paso del tiempo, los atletas en silla de ruedas han sido la principal motivación de la innovación y ergonomía de los dispositivos de asistencia. En las últimas décadas, los deportes en silla de ruedas han evolucionado en una gran variedad de disciplinas de alto desempeño y alta especialización. Su uso a nivel de alto desempeño requiere emplear sillas optimizadas y diseñadas especialmente, altos niveles de entrenamiento físico, así como, grandes cualidades técnicas de los atletas [10]. Además de los atletas y entrenadores, investigaciones experimentales han contribuido al desarrollo de los deportes para aquellos con discapacidad en general [51, 52, 53] y particularmente para los deportes que utilizan estos dispositivos [54, 55, 56] en una limitada pero importante manera.

Con un porcentaje mayor al 90% del total de sillas de ruedas propulsadas mediante el método de propulsión convencional [57], este medio de propulsión ha dominado en los deportes en sillas de ruedas, como también en las de uso diario. No obstante, es un método ineficiente y muy exigente para los sistemas músculo esquelético [30, 58] y cardiopulmónar [59, 60, 61, 62].

En un intento por reducir la carga física que implica el utilizar el MPC, surgieron dispositivos eléctricos, capaces de asistir a los usuarios durante la propulsión, mediante el uso de motores eléctricos y baterías como el dispositivo propuesto en [63]. Este dispositivo es desmontable y es capaz de montarse en diferentes tipos de sillas de ruedas; sin embargo, el hecho de utilizarlo disminuye la actividad física de los usuarios, provocando una mala condición física y problemas cardiovasculares por falta de ejercicio, es por ello que si se tiene la capacidad de utilizar métodos de propulsión manuales, se utilicen por encima de los motorizados.

A finales de la década de los 60s, estudios físicos mostraron que otras formas de propulsión manual fueron más eficientes y por lo tanto disminuyeron el esfuerzo, reduciendo la exigencia para el aparato cardiorrespiratorio y posiblemente para el sistema músculo esquelético. Utilizando esos sistemas de propulsión se mejora el tiempo de resistencia, el máximo desempeño y posiblemente puedan prevenir la ocurrencia de lesiones en los brazos. Los sistemas de propulsión mediante brazo-manivela y palancas son los mecanismos de propulsión alternativos más utilizados. Estos mecanismos reducen considerablemente el esfuerzo físico en comparación con el MPC [64, 65, 66, 67], a pesar de las típicas desventajas como el tamaño, peso y apariencia.

En los últimos años, mecanismos alternativos de propulsión se convirtieron en comerciales, inicialmente considerados como dispositivos para entrenamiento y deportes, posteriormente para el uso general en la vida diaria [54, 68, 69, 58]. Estos sistemas alternativos de propulsión, por su diseño mejorado y mayor eficiencia mecánica, permiten mayores velocidades y un incremento en el tiempo de resistencia física. Como consecuencia, en competiciones deportivas con categoría abierta, los triciclos propulsados por la parte superior del cuerpo se volvieron populares.

El interés por encontrar nuevas formas de propulsión para sillas de ruedas manuales se ha plasmado con diversas propuestas, surgiendo diferentes dispositivos para propulsar una silla de ruedas. Es posible identificar tres principales métodos alternativos de propulsión: *hub-crank* o manivela de eje, *propulsión por palancas* y finalmente dispositivos tipo *handcycle*.

1.7.1. *Hub crank*

Un mecanismo alternativo de propulsión es el *hub crank* (Figura 1.21), que es un dispositivo que permite un movimiento continuo de las manos alrededor del eje de las ruedas traseras de la silla de ruedas mediante la conexión de una manivela con el eje. Dada la baja posición del asiento en las sillas de ruedas de carreras, donde fue utilizado principalmente, las manivelas permiten una aplicación continua de la fuerza hacia las ruedas en una orientación de los brazos y manos muy similar a la vista durante el MPC. Este dispositivo tiene una agarradera que se ajusta a la mano y rota libremente alrededor de un eje perpendicular a la manivela y se adapta a la orientación de las manos. Este mecanismo alternativo de propulsión fue principalmente utilizado por atletas a mediados de los 80s para entrenamiento, deportes y recreación [70, 71, 72].



Figura 1.21: Dispositivo de propulsión alternativo *hub crank* [10]

Sin embargo, este sistema aparentemente no es altamente práctico debido a que la maniobrabilidad y el frenado son complicados y requieren aprendizaje considerable. El mecanismo alternativo hub-crank tiene ventajas como: el movimiento continuo sin tiempos muertos durante los cuales no se genera potencia, el movimiento involucra un mayor número de músculos reduciendo la carga muscular, la manija permite una orientación natural de la mano y la muñeca, también podría beneficiar para los problemas en los brazos causados por el sobreuso.

Actualmente sigue utilizándose, pero ha sido restringido a sillas de ruedas para pista o de carreras y para el uso en exteriores. La silla de ruedas con este dispositivo es difícil de direccionar, el frenado es aún más complicado y el incremento en el ancho de la silla complica su utilización en interiores. En consecuencia, este tipo de dispositivos no son ampliamente utilizados; sin embargo, estos aspectos podrían ser mejorados con investigación y diseños innovadores.

1.7.2. Propulsión por palancas

En la propulsión por palancas se realiza un movimiento cíclico con las manos (síncrono o asíncrono), generalmente la fuerza es transferida indirectamente a las ruedas a través de un simple mecanismo de palanca, la cual se empuja o se jala. Este método a través de palancas fue pensado para ser una alternativa para el uso en exteriores de la silla de ruedas e incluso para interiores. Especialmente para aquellos individuos con fuentes de energía limitadas o aquellos que requieren desplazarse más allá del área alrededor de la casa, la propulsión por palancas podría ser un dispositivo alternativo adecuado para movilidad.

El artículo [11], propone un mecanismo de propulsión por palanca como el mostrado en la Figura 1.22. Este mecanismo se combina con un trinquete, mecanismo que permite la propulsión hacia adelante, bloqueando el giro de la rueda para que no se pueda desplazar hacia atrás en las rampas. Su diseño le permite montarse en diferentes sillas de ruedas, utilizando un sistema de brazos que se acoplan al aro de propulsión por presión. Este mecanismo transfiere el torque cuando la palanca se mueve hacia delante, teniendo una fase de recuperación en la que, mediante un resorte, la palanca se regresa a la posición inicial. El objetivo principal de este dispositivo es asistir a los usuarios al subir rampas, sin embargo, es posible utilizarlo como dispositivo de propulsión.

En [73] se presenta un dispositivo desmontable de propulsión para sillas de ruedas en el cual se tiene un mecanismo que combina una palanca unida a rieles concéntricos montados en el exterior de la rueda, logrando un comportamiento de manivela que con el movimiento hacia adelante y hacia atrás de la palanca logra el giro de las ruedas. Este dispositivo es muy sencillo y fácil de operar; sin embargo, si la rueda se encuentra girando debido a la inercia del movimiento las palancas continúan moviéndose lo cual puede ser peligroso para los usuarios.

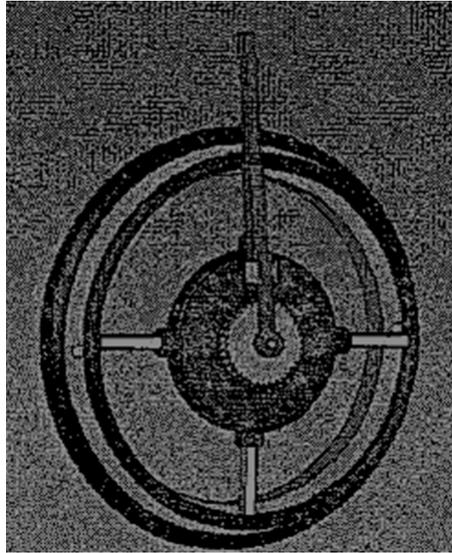


Figura 1.22: Mecanismo compuesto por palanca y trinquete [11].

Se han presentado patentes como [74] [75], en las cuales coincide el uso de palancas como método de propulsión alternativo. En [74] se tienen dos palancas montadas a cada lado junto con mariposas (elementos de transmisión de fuerza, utilizados en las transmisiones de bicicletas) sobre la estructura de la silla de ruedas, las cuales transmiten el torque proporcionado por el usuario mediante cadenas a otras mariposas en el eje de las ruedas, también cuenta con un freno de fricción que utiliza cables, muy similar al de las bicicletas. En [75] se presenta un dispositivo muy similar, con diferencias en la configuración de los elementos, se utilizan frenos de disco también mediante cables y una palanca con una configuración de agarre horizontal y no vertical como las patentes que utilizan palancas.

Documentos más recientes como [76] [12] también utilizan palancas además de distintos elementos para propulsar la silla de ruedas. El dispositivo de [76] incluye embragues y engranes acoplados en el eje principal de las ruedas traseras, mediante el movimiento de la palanca es posible propulsar la silla de ruedas hacia adelante, en reversa, tener un engrane neutral y frenar además de contar con un sistema de bloqueo muy útil para subir rampas.

En [12], mostrado en la Figura 1.23, se utiliza la palanca montada en el eje de las ruedas, junto con un elemento de fricción teniendo contacto con el aro de asistencia y transmitiendo la fuerza que el usuario aplica a las ruedas. La palanca tiene libertad de movimiento axialmente con respecto al eje, acoplando y desacoplando el elemento de contacto con el aro, siendo posible propulsar la silla de ruedas hacia adelante y hacia atrás además de ser utilizado como freno. Este dispositivo es muy simple y fácil de operar además de tener las ventajas que la propulsión con palancas proporciona. Se debe lograr que el elemento de contacto y el aro de asistencia tengan un coeficiente de fricción suficiente para que no haya deslizamiento y se pierda la fuerza que se proporcionó por el usuario.

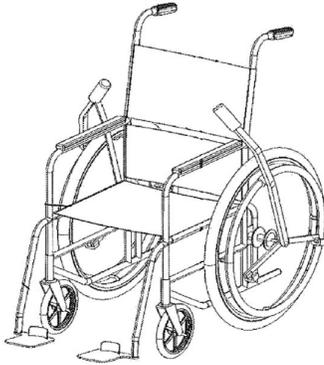


Figura 1.23: Propulsión por palancas y elemento de fricción [12].

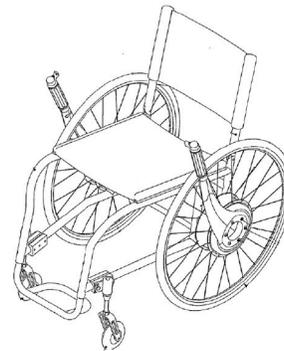


Figura 1.24: Silla de propulsión por palancas y sistema de engranes [13].

En [13], mostrado en la Figura 1.24, se presenta un mecanismo de propulsión que consta de palancas y una transmisión de engranes y resortes interpuesta entre la palanca y la rueda de la silla, que permite propulsar hacia adelante y hacia atrás selectivamente mediante un mando de selección acoplado a un cable y al extremo de la palanca. Utiliza un embrague de plato con dientes de engrane para seleccionar la dirección de giro de la rueda o dejar sin engranar la transmisión. Este dispositivo se acopla a cada rueda permitiendo una propulsión independiente, sin embargo, es un mecanismo complejo que requiere de mayor mantenimiento y un costo relativamente elevado.

Una ventaja de la propulsión por palancas es el patrón de movimiento sencillo y continuo de los brazos que involucran un mayor número de músculos (flexión y extensión) durante cada ciclo entero de trabajo. Esto extiende el esfuerzo físi-

co sobre un mayor número de músculos. Las fuerzas posiblemente también son aplicadas en un rango preferible de movimiento y direcciones del cuerpo humano comparado con el MPC. No hay fuerzas de impacto en articulaciones y músculos debido al contacto continuo de las manos con el dispositivo de propulsión y a la aplicación casi constante y continua de la fuerza. Las orientaciones de las manos y las muñecas se encuentran dentro del campo de visión del usuario lo que parece mejorar el control. También permite un mejor acoplamiento de las manos con el dispositivo y al mismo tiempo se tiene una orientación neutral de la muñeca. Esto reduce considerablemente la necesidad de estabilizar la actividad muscular [30, 77, 78]. Los mecanismos de propulsión por palancas muestran ser superiores en términos de gasto de energía y esfuerzo físico. Diferencias de un incremento en la eficiencia mecánica de hasta el 3% fueron reportadas en [79].

Los dispositivos de propulsión por palancas normalmente impulsan al empujar o jalar la palanca y es necesario regresar al punto de inicio, llamada fase de recuperación, para volver a impulsar la silla de ruedas. Sin embargo, hay algunos dispositivos que eliminan la fase de recuperación en la propulsión. Un ejemplo es el que se presenta en [14] (Figura 1.25); este dispositivo utiliza un arreglo de ruedas dentadas y una transmisión por cadena, la cual permite que la silla de ruedas pueda ser impulsada hacia adelante al empujar o jalar la palanca, sin la necesidad de regresar a un punto de inicio establecido.



Figura 1.25: Dispositivo de palanca sin fase de recuperación [14].

Otro sistema similar se presenta en [15], llamado *Quantum Runner* (Figura 1.26), este dispositivo al igual que el anterior impulsa a la silla hacia adelante al jalar o empujar la palanca utilizando elementos similares pero con una configuración diferente. Dichos dispositivos no son capaces de impulsar la silla hacia atrás con el movimiento que utilizan, por lo que se pierde movilidad y maniobrabilidad en espacios reducidos y son generalmente utilizados para uso exterior.



Figura 1.26: Silla Quantum Runner [15].

1.7.3. Propulsión mediante *handcycle*

Resultados experimentales indican que el sistema *handcycle* o brazo-manivela estacionario es más eficiente que el MPC y la potencia de salida es considerablemente más alta [80, 81, 82, 83]. Se han realizado estudios en los que se tiene una misma potencia de salida para el *handcycle* estacionario y para el MPC y se identificó que el consumo de energía, el consumo de oxígeno y el ritmo cardíaco son significativamente menores durante el ejercicio realizado con el sistema tipo *handcycle*, en comparación con el MPC [65, 67, 81, 82, 83, 84, 85, 86]. En los estudios hechos por Sedock, Tropp y Martel [67, 86, 87], se encontró una eficiencia mecánica significativamente mayor para el ejercicio realizado *handcycle*, la prueba se realiza con 20 sujetos con paraplejía y se encuentran valores de eficiencia mecánica de 16.3% para el sistema *handcycle* y de 11.6% para el MPC [86, 87, 67].

Los sistemas de propulsión tipo *handcycle* utilizan un sistema brazo-manivela para producir la fuerza de propulsión; además, cuentan con un sistema para direccionar la silla de ruedas y el movimiento realizado con dispositivos tipo

handcycle puede ser síncrono o asíncrono. La forma de propulsión mediante *handcycle* suele ser más utilizada para deportes, ya sea síncrono o asíncrono, debido a las altas velocidades que se pueden alcanzar con este tipo de sistema de propulsión, los utilizados por deportistas en sillas de ruedas suelen ser de una pieza y su uso no está limitado a personas con problemas para caminar o con alguna discapacidad, pudiéndolos utilizar cualquier persona. Un ejemplo es [88] que es un *handcycle* de tres ruedas, dos traseras y una delantera en la cual se encuentra montado un sistema de mariposas y cadenas para transmitir el torque proporcionado mediante el movimiento circular de los brazos; cuenta con una estructura que soporta al usuario además de un volante que permite dar dirección a la rueda delantera. Este tipo de dispositivos son de mayor tamaño lo cual restringe la movilidad en espacios pequeños.

En [16] se presenta el dispositivo mostrado en la Figura 1.27, capaz de adaptarse como accesorio a la estructura de diferentes sillas de ruedas. El método de propulsión utilizado por este dispositivo utiliza un movimiento similar al de una bicicleta con la diferencia de que en lugar de utilizar las piernas se utilizan las manos para poder producir el torque que posteriormente se transmite a una tercera rueda mediante elementos como mariposas y cadenas para iniciar el movimiento.

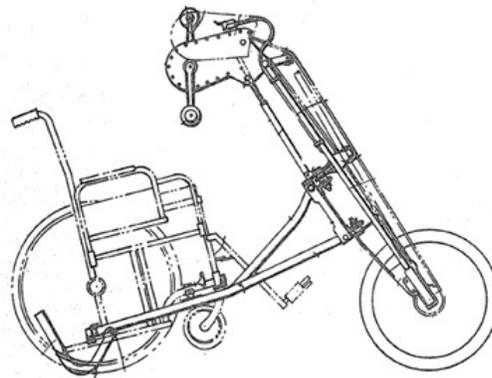


Figura 1.27: Silla de ruedas con propulsión por *handcycle*[16]

Este dispositivo permite lograr mayores velocidades, además cuenta con una forma de dar dirección a la silla de ruedas ya que el dispositivo mismo, sirve como volante para la tercera rueda que convierte la silla de ruedas en una especie de triciclo y es capaz de ajustarse a las dimensiones de diferentes personas. Este dis-

positivo es conveniente ya que reduce la amplitud de movimiento de los brazos y las posturas incómodas que se podrían tener durante el MPC. Al ser un accesorio de tamaño considerable implica algunas desventajas, ya que se reduce la maniobrabilidad en espacios pequeños además de añadir peso extra a la silla de ruedas.

En [89] se presenta el dispositivo mostrado en la Figura 1.28, este dispositivo tipo *handcycle* es desmontable y se adapta a la mayoría de sillas de ruedas, similar a [16], con la diferencia de que este se monta sobre la parte delantera de la estructura de la silla de ruedas, en donde también se encuentran los reposapiés. Además, cuenta con distintas características como el ajuste de la longitud de la cadena utilizada y la altura a la que están las manivelas. Se tiene una columna principal con una tercera rueda, en la columna se encuentran las manivelas junto con una mariposa y una cadena que se extiende hasta la mariposa en el eje de la rueda para transmitir la fuerza e impulsar la silla de ruedas. Cuenta con dos brazos y un amortiguador en cada uno de ellos los cuales se montan sobre 4 puntos en la estructura de la silla de ruedas mediante abrazaderas, al montar el mecanismo las ruedas delanteras de la silla se elevan para tener contacto con las 2 ruedas traseras y la rueda adicional del dispositivo de propulsión.

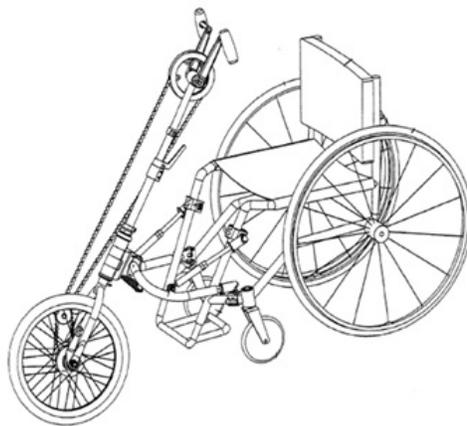


Figura 1.28: Silla de ruedas con propulsión por *handcycle*

En contraste con el MPC, los dispositivos propulsados por brazo-manivela o por palancas, permiten formas naturales de movimiento de los brazos. El uso común de sistemas con engranes permite propulsar la silla de ruedas bajo diferentes condiciones del entorno (rampas, topes, terreno disperejo) y para dife-

rentes grupos de usuarios. Dadas estas mejoras prácticas, la cuestión de evidencia experimental necesita mayor atención. El conjunto de características benéficas de sistemas propulsados mediante *handcycle* y mediante palancas están resumidas en la Tabla 1.3. Estos modos alternativos de propulsión claramente necesitan optimización ergonómica (disminuir las posiciones y movimientos que puedan causar algún daño) por la parte de la interface silla de ruedas-usuario. Su uso es preferible por encima del MPC para sillas de ruedas manuales en exteriores.

Tabla 1.3: Características de diferentes mecanismos de propulsión, partes basadas en datos experimentales [10].

	MPC		<i>Handcycle</i>		Palancas	Hub crank
	Estándar	De pista	Fijo	Desmontable		
Eficiencia mecánica máxima (%)	<10	<8	>13	>13	>13	>12
Esfuerzo (Sistema cardiovascular)	alto	alto	bajo	bajo	bajo	bajo?
Esfuerzo (Sistema musculoesquelético)	alto	alto	bajo	bajo	bajo	bajo?
Riesgo de lesión RSI	alto	alto	bajo?	bajo?	bajo?	bajo?
Velocidad máxima (km/hr)	15	30	>30	30	30	30
Masa (kg)	<10	<8	(10-15)	15	(10-15)	<10
Acoplamiento de la mano	-	-	++	++	++	+
Dirección de la fuerza	-	-	+	+	++	+
Bi-modo	-	+	+	+	+	+
Producción de trabajo continuo	-	+	+	+	+	+
Uso exterior	+	++	+++	+++	++	+
Maniobrabilidad	++	±	-	-	-	-
Uso interior	++	±	-	±	-	-
Manejo	++	±	±	±	±	-
Frenado	±	-	+	+	+	-
Transportación	++	++	-	+	-	±
Mantenimiento	+	+	±	±	±	+

•Nota: los símbolos de interrogación son debido a que se tiene poca investigación sobre como afectan los métodos alternativos de propulsión al riesgo de lesiones. Mientras que los símbolos + y - se utilizan como forma de comparación entre los diferentes dispositivos, mientras mayor número de símbolos + mejor es, el símbolo ± se utiliza para establecer un punto medio en el cual no es bueno ni malo y finalmente a mayor número de símbolos - peor es.

1.8. Técnicas y metodologías de diseño

1.8.1. Diseño centrado en el usuario (DCU)

Son un conjunto de técnicas y metodologías de diseño que se basan en las necesidades, objetivos, expectativas, motivaciones y capacidades de los usuarios. Algunas de las técnicas del diseño centrado en el usuario son:

- Entrevistas y cuestionarios. Utilizada para obtener información útil para el desarrollo del producto.
- Observación en el lugar. Útil para recolectar información acerca del entorno en el cual el producto va a ser utilizado.
- Test de usabilidad. Se recolectan datos sobre criterios mensurables de usabilidad, realizando pruebas con los usuarios reales utilizando el producto.

En ocasiones los ingenieros no toman en cuenta a los clientes finales o usuarios, obteniendo así un producto final deficiente que no cumple con los requerimientos y necesidades de aquellos para los cuales va dirigido. Es por ello que las técnicas de DCU son herramientas importantes si se quiere obtener un producto final que satisfaga al usuario final. El enfoque centrado en el usuario se utilizará en este proyecto para los siguientes dos puntos:

1. Conocer a los usuarios finales, normalmente usando investigación cualitativa o investigación cuantitativa.
2. Diseñar un producto que resuelva sus necesidades y se ajuste a sus capacidades, expectativas y motivaciones.

Para recabar información útil para el proyecto, es posible utilizar cuestionarios, encuestas o realizar entrevistas. De las herramientas disponibles se seleccionó la encuesta, técnica del DCU, por su simplicidad y rapidez de aplicación. Para recopilación de datos por medio de un cuestionario previamente diseñado o una entrevista a alguien, sin modificar el entorno ni el fenómeno donde se recoge la información.

1.8.2. Generación de propuestas

Para la generación de ideas y propuestas de diseño hay técnicas como lluvia de ideas [90], pensamiento lateral [91], etc. Éstas proporcionan más herramientas al diseñador para poder tener propuestas innovadoras para resolución de problemas. A continuación se describen las técnicas utilizadas en este trabajo.

La lluvia de ideas

También denominada tormenta de ideas, es una herramienta de trabajo grupal que facilita el surgimiento de nuevas ideas sobre un tema o problema determinado. La lluvia de ideas es una técnica de grupo para generar ideas originales en un ambiente relajado. Esta herramienta fue ideada en el año 1938 por Alex Faickney Osborn, cuando su búsqueda de ideas creativas resultó en un proceso interactivo de grupo no estructurado que generaba más y mejores ideas que las que los individuos podían producir trabajando de forma independiente; dando oportunidad de hacer sugerencias sobre un determinado asunto y aprovechando la capacidad creativa de los participantes [90].

Metodologías de TRIZ [92]

TRIZ es el acrónimo en ruso de “Teorija Rezbenija Izobretatelskib Zadach” o Teoría de Resolución Inventiva de Problemas. Surgió en Rusia en los años 40 al final de la segunda Guerra Mundial de la mano de Genrich Altshuller. Altshuller analizó y clasificó diferentes patentes, posteriormente se dedicó a investigar un método para la resolución de problemas que ayudó a los ingenieros de la marina rusa. De todas las patentes que analizó, seleccionó aproximadamente cuarenta mil, que consideró como verdaderamente innovadoras o inventivas.

De acuerdo con la teoría TRIZ, la evolución tecnológica es producida supuestamente por un proceso azaroso, con el paso del tiempo este proceso tiende a seguir patrones repetibles. Es entonces que se da la posibilidad de aplicar de manera sistemática los patrones encontrados, en el desarrollo de nuevos sistemas tecnológicos. Es por ello que TRIZ indica los patrones que imperan sobre la evolución de la tecnología, lo que permite anticipar el rumbo que tomarán las siguientes generaciones tecnológicas.

1.8.3. Evaluación y selección de propuestas

La técnica de Despliegue de la Función de Calidad o QFD (por sus siglas en inglés), es principalmente utilizado en el desarrollo de nuevos productos y servicios, es un método que reúne información proporcionada por los clientes y que posteriormente es transformada a través de un proceso en características de diseño y operación capaces de satisfacer las demandas y expectativas de los clientes.

En este método se realizan encuestas, cuestionarios o entrevistas a los potenciales consumidores, en las que se les pide describir sus requerimientos de calidad utilizando sus propias palabras [93].

La principal herramienta del QFD es una matriz compuesta de submatrices, en la cual se relacionan los requerimientos de los clientes con las características técnicas capaces de satisfacerlos. Esta herramienta es llamada matriz de la calidad o casa de la calidad, cuyo contenido se resume en los siguientes elementos:

- Una matriz donde se encuentra la prioridad que los clientes asignan a cada requerimiento.
- Una matriz en la que se compara cada uno de los requisitos dados por los clientes con la competencia, basándose en evaluaciones hechas por los mismos clientes.
- Una matriz en la que se tiene una ponderación numérica de las características técnicas con respecto a las demás.
- Una matriz que contiene una evaluación de las características técnicas del producto.
- Un valor objetivo fijado para cada característica técnica.
- Una matriz que indica la correlación que existe entre cada una de las distintas características técnicas.

1.8.4. Diseño asistido por computadora (CAD)

El CAD es una técnica que brinda la posibilidad de crear el modelo de un producto antes ser construido. Así pues, es posible conocer su comportamiento antes de ser producido, sin la necesidad de dibujos en papel en la etapa de diseño [94].

La utilización de software CAD en la ingeniería abarca muchos aspectos, desde diagramas de diferentes tipos, cuadros sinópticos, gráficos estadísticos o el modelado de piezas y productos para su diseño y manufactura, hasta la representación de un modelo tridimensional junto con análisis de elementos finitos y simulaciones virtuales.

El método de diseño CAD se divide en cuatro principales etapas:

- *Modelado geométrico.* Se describe como forma matemática o analítica a un objeto físico, el diseñador construye un modelo geométrico emitiendo comandos que crean líneas, superficies, cuerpos, dimensiones y texto; los comandos introducidos dan origen a una representación exacta en dos o tres dimensiones del objeto. El representado en línea abarca todas las aristas del modelo que se pueden considerar como líneas llenas dando como resultado una imagen ambigua ya que algunas veces las formas son complicadas y para facilitarlos se pueden usar los colores para distinguir las líneas de las piezas y tener una mejor visualización. Sus estructuras se representan en 2 y 3 dimensiones.
- *Análisis y optimización del diseño.* Después de haber determinado las propiedades geométricas, se analiza el modelo virtual para verificar que no haya errores en el modelado (dimensiones, formas, etc).
- *Revisión y evaluación del diseño.* En esta etapa se comprueba si existen interferencias entre componentes de cierto mecanismo que impidan su correcto funcionamiento o deficiencias estructurales, en el caso de cuerpos sólidos. Esta etapa es de gran utilidad, ya que ayuda a evitar problemas posteriores en la producción del producto, ya sea en el ensamble o en el uso de la pieza. Existen programas de animación y simulación dinámica para el cálculo y análisis de las propiedades físicas (esfuerzos, deformaciones, deflexiones, vibraciones) de los objetos que ayudan a determinar si el objeto cumple con los requerimientos de diseño y de manufactura.
- *Documentación y dibujo.* Por último, se realizan planos técnicos y de trabajo. Se representan diferentes vistas de la pieza, a escala e incluyendo perspectivas. Además de planos del diseño, la documentación puede incluir documentos escritos con aspectos no gráficos, necesarios para su manufactura.

1.9. Conceptos utilizados en la fase de diseño de detalle

En este apartado se presenta la teoría necesaria para el diseño de detalle de la propuesta que se hace en el proyecto. Conceptos acerca de mecanismos y sus tipos, sobre sistemas de transmisión por cadena y conceptos básicos para el análisis y síntesis de mecanismos.

1.9.1. Palanca

La palanca es una de las denominadas máquinas simples, utilizada en muchas de las herramientas y máquinas hoy en día. Su objetivo principal es el de proporcionar una ventaja mecánica, multiplicando la fuerza de entrada por un factor relacionado con las distancias entre los puntos de aplicación de las fuerzas [17].

Es posible determinar la ventaja mecánica que proporciona la palanca mediante el equilibrio de pares producidos por las fuerzas:

$$(F_e)(L_e) = (F_s)(L_s) \quad (1.1)$$

Por lo tanto, el factor que multiplica la fuerza de entrada depende de la relación de longitudes que se tenga.

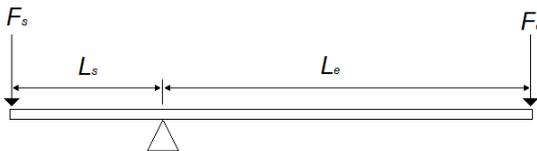


Figura 1.29: Diagrama de palanca.

$$\frac{F_e}{F_s} = \frac{L_s}{L_e} \quad (1.2)$$

1.9.2. Mecanismo y tipos de mecanismos

Mecanismo, es un dispositivo mecánico cuyo propósito es transferir el movimiento o fuerza de una fuente a una salida. Generalmente se compone de diferentes cuerpos o elementos, llamados *eslabones* (o barras), conectados por *juntas* (o articulaciones) que permiten el movimiento relativo entre ellos para formar eslabonamientos de cadenas abiertas o cerradas (lazos). Generalmente los eslabones son considerados rígidos, esto quiere decir, que la separación entre dos puntos

cualesquiera de un cuerpo siempre es la misma, independientemente del tiempo. Evidentemente, los ángulos formados por cualquier terna de puntos siempre serán fijos. Los mecanismos se dividen, dependiendo del movimiento que realizan, en mecanismos planos y mecanismos espaciales [17].

- *Mecanismos planos*: son aquellos en los cuales, el movimiento de los elementos que los componen, se limita a curvas o trayectorias descritas en planos paralelos con respecto a un plano en común. Gran parte de los mecanismos utilizados en las máquinas y dispositivos de hoy en día, son mecanismos planos, su versatilidad y aplicación es muy amplia, desde mecanismos para bombas de petróleo hasta mecanismos más sencillos, como el utilizado en las pinzas de presión [17].
- *Mecanismos espaciales*: Estos mecanismos no se limitan a planos, tienen la capacidad de realizar movimientos en tres dimensiones, pudiendo realizar rotaciones hasta en tres ejes no paralelos y traslaciones en tres direcciones diferentes, dependiendo de las limitaciones que se tengan en las articulaciones [17].

Grados de libertad (GDL)[17], se define como el número de entradas independientes necesarias para determinar la posición de cada uno de los eslabones de un mecanismo con respecto a la referencia (tierra). Es posible determinar el número de GDL de un mecanismo a través de la ecuación de *Gruebler*:

$$GDL = 3(n - 1) - 2J \quad (1.3)$$

Donde n es el número total de eslabones y J es el número de juntas o articulaciones.

Los mecanismos con un grado de libertad, suelen tener un movimiento restringido; sin embargo, estos mecanismos son los más utilizados, debido a que la mayoría de las tareas que debe cumplir un mecanismo requieren de una entrada y una salida.

Diagrama cinemático[17], este diagrama asume dos principales formas: un croquis proporcional, sin precisión en escala; la segunda es un diagrama a escala, usado para un análisis de posición, velocidad y aceleración. El diagrama cinemático, generalmente es utilizado como referencia, ya que es posible identificar el número de eslabones y juntas, así como un esquema de los movimientos relativos del mecanismo.

El dibujar un diagrama cinemático es uno de los primeros pasos en el proceso de *síntesis de mecanismos y análisis de mecanismos*. Síntesis se refiere al proceso en el cual se diseña un mecanismo con el objetivo de realizar la tarea que se desea, donde las dimensiones (*síntesis dimensional*), como el tipo de mecanismo (*síntesis de tipo*) pueden ser parte del proceso. Por otra parte, el *análisis* es el proceso en el cual se averigua el funcionamiento de un mecanismo particular, con base en características conocidas como: dimensiones, posición, velocidades angulares, aceleraciones angulares, etc. [17].

1.9.3. Mecanismo plano de cuatro barras

Un *mecanismo plano de cuatro barras* tiene tres elementos móviles y uno fijo (tierra), sus elementos se conectan mediante cuatro juntas revoluta (pernos o pasadores), las cuales permiten el giro de los eslabones. Se tiene un eslabón de entrada, que se encuentra conectado con la fuente, un eslabón flotante o acoplador, que conecta los dos pivotes o barras conectadas a tierra y un eslabón seguidor o de salida. En la Figura 1.30 se muestra un ejemplo de este tipo de mecanismo.

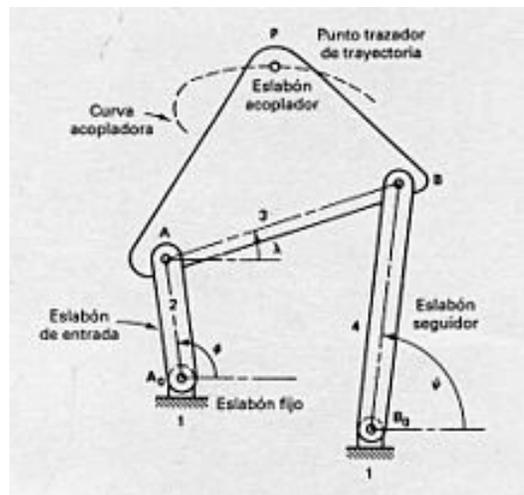


Figura 1.30: Mecanismo de 4 barras [17].

Ángulo de transmisión [17], es uno de los criterios para determinar la eficiencia con la que se transmite el movimiento del eslabón de entrada al eslabón de salida, siendo el valor óptimo un ángulo de 90° , así mismo se recomienda una tolerancia de $\pm 50^\circ$. Este ángulo, generalmente es uno de los parámetros críticos de diseño, es por ello que cada mecanismo necesita de un análisis para determinar el rango

de valores que puede tomar el ángulo de transmisión, encontrando el valor máximo y mínimo. Para mecanismos de barras o eslabonamientos, se recomienda un ángulo de transmisión mínimo de 40° .

El ángulo de transmisión de un mecanismo plano de cuatro barras, con movimiento de balancín manivela, se muestra en la Figura 1.31 como γ .

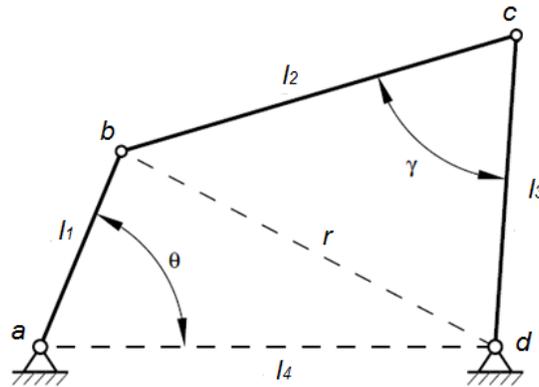


Figura 1.31: Ángulo de transmisión de un mecanismo de cuatro barras [18].

Conociendo las longitudes l_1 , l_2 , l_3 , l_4 y aplicando la ley de cosenos para los triángulos formados por las líneas punteadas se tiene lo siguiente:

Del triángulo abd se obtiene:

$$l_1^2 + l_4^2 - 2l_1l_4\cos\theta = r^2 \quad (1.4)$$

Del triángulo bcd se obtiene:

$$l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3\cos\gamma = r^2 \quad (1.5)$$

Igualando la ecuación(1.4) con la ecuación (1.5) se obtiene la siguiente expresión:

$$l_1^2 + l_4^2 - 2l_1l_4\cos\theta = l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3\cos\gamma \quad (1.6)$$

Para poder determinar los valores máximo y mínimo del ángulo de transmisión, se deriva la ecuación de (1.6) con respecto a θ y γ y se iguala a cero.

$$\frac{d\gamma}{d\theta} = \frac{l_1l_4\sen\theta}{l_2l_3\sen\gamma} = 0 \quad (1.7)$$

La ecuación (1.7) solo se cumple cuando $\text{sen}\theta = 0$, lo que indica que $\theta = 0^\circ$ ó $\theta = 180^\circ$, como se puede observar en la Figura 1.32. Así pues, es posible determinar el ángulo de transmisión máximo y mínimo en términos de las longitudes de los eslabones.

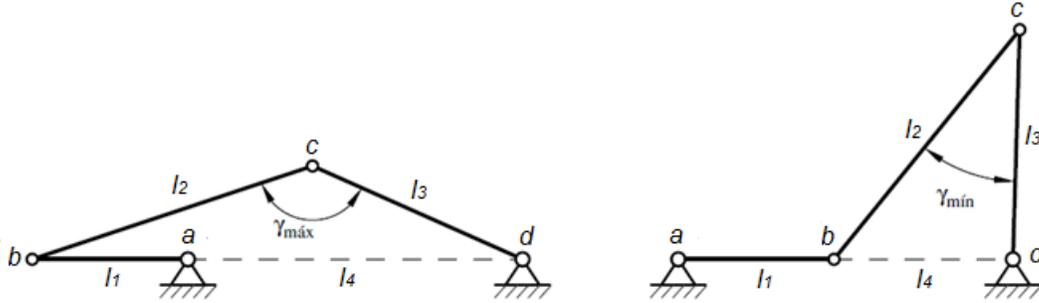


Figura 1.32: Posiciones del mecanismo donde se tiene el ángulo de transmisión máximo y mínimo [18].

$$\gamma_{max} = \cos^{-1} \left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - (l_1 + l_4)^2}{2l_2l_3} \right) \quad (1.8)$$

$$\gamma_{min} = \cos^{-1} \left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - (l_1 - l_4)^2}{2l_2l_3} \right) \quad (1.9)$$

Ley de Grashof[17], esta ley establece que la suma de las longitudes de los eslabones más corto y más largo de un mecanismo plano de cuatro barras, debe ser menor o igual a la suma de las longitudes de los dos eslabones restantes, para garantizar una rotación continua en al menos uno de los eslabones.

$$l + c \leq m + n \quad (1.10)$$

Donde l es la longitud del eslabón más largo, c del eslabón más corto, m y n son las longitudes de los eslabones restantes.

1.9.4. Principio del trabajo virtual

Este principio, es parte de la base necesaria para determinar las ecuaciones de movimiento de un mecanismo o sistema mecánico. El teorema enunciado por el principio del trabajo virtual, considera los sistemas mecánicos como ideales, es

decir, considera que las fuerzas de restricción (fuerzas que aparecen en los pares de unión de los eslabones, encargadas de evitar que el mecanismo se descomponga) no realizan trabajo. “Este principio establece que un cuerpo se encuentra en equilibrio, si y solo si, el trabajo virtual realizado por las fuerzas y momentos externos que actúan en un mecanismo, es nulo” [95].

$$\delta W = \delta R.F + M\delta\theta = 0 \quad (1.11)$$

Donde: δW es el trabajo total realizado en el sistema.

$\delta R.F$, es el trabajo virtual realizado por las fuerzas.

$M\delta\theta$, es el trabajo realizado por los momentos.

Mediante la aplicación de este principio, es posible establecer una ecuación de equilibrio sin la necesidad de conocer las fuerzas de restricción generadas en un mecanismo.

1.9.5. Transmisión por cadenas

La transmisión por medio de cadena, es la mejor opción cuando la aplicación requiere transmitir torques y donde las velocidades de giro de los ejes de transmisión se encuentran en un rango de velocidades medias a bajas. Este tipo de transmisiones es robusto, lo que significa que las condiciones en las que pueden trabajar pueden variar ampliamente, llegando incluso hasta condiciones ambientales adversas como: polvo, lluvia y temperaturas elevadas. Por otra parte, es necesaria una lubricación adecuada. Además, proporcionan una relación de velocidades fija y un ángulo de giro de los ejes invariante, por lo que su aplicación en maquinaria en general es muy grande.

Los principales elementos que componen una transmisión común por cadena son básicamente dos, los *sprockets* o mariposas y la cadena de eslabones. Los *sprockets* son ruedas dentadas, generalmente conectadas con ejes para poder transmitir el par deseado. Existe gran diversidad de tipos, en la Figura 1.33 se presentan algunos de ellos.



Figura 1.33: Ejemplos de sprockets [19].

Las especificaciones más importantes para el diseño y fabricación de *sprockets* son las siguientes:

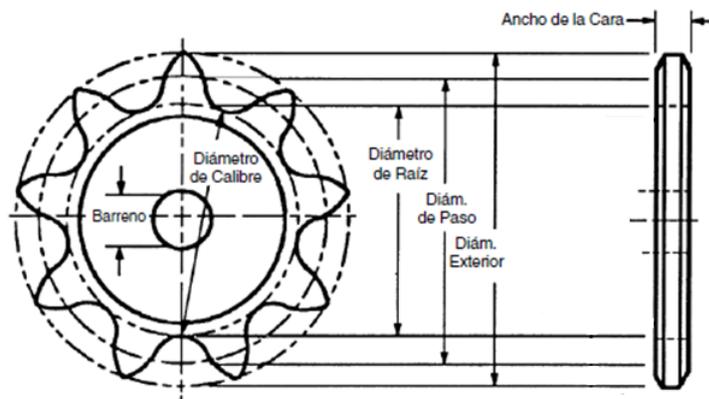


Figura 1.34: Especificaciones dimensionales de los sprockets [19].

- *Paso* es la distancia entre los centros de los pernos contiguos de la cadena (ver Figura 1.36).
- Diámetro raíz (Figura 1.34), es el diámetro de la circunferencia que es tangente a las cavidades formadas entre los dientes.
- Diámetro de calibre (Figura 1.34), para un *sprocket* con número de dientes impar, el diámetro raíz no es posible medirlo directamente, para ello es el diámetro de calibre, que se mide a través de los espacios opuestos más cercanos.

- Diámetro de paso (DP) (Figura 1.34), es aquel que sigue el centro de los pernos de la cadena cuando se encuentra en contacto con la rueda dentada y se determina por la ecuación (1.12), donde N es el número de dientes.

$$DP = \frac{Paso}{\text{Sen}(180/N)} \quad (1.12)$$

- Diámetro exterior (DE) (Figura 1.34), es el diámetro del círculo tangente a las puntas de los dientes. Esta medida no suele tener demasiada importancia, debido a que la longitud del diente no es fundamental para lograr un enganche adecuado de la cadena, determinada por la ecuación (1.13)

$$DE = (Paso)(0.6 + \text{Cot}(180/N)) \quad (1.13)$$

- Ancho de cara (Figura 1.34), esta dimensión está limitada a la necesaria para que la cadena pueda engancharse y desengancharse libremente.
- Barreno, es el orificio central necesario para colocarse, generalmente se utiliza cuñero y opresores para su ensamble.

Por otra parte, las cadenas son compuestas por eslabones, éstos a su vez, se componen de más elementos que pueden variar en distintas características como forma y cantidad. Las cadenas más comunes son las de rodillos, debido a que resultan adecuadas para la mayoría de condiciones de trabajo, en la Figura 1.35 se pueden observar las principales partes de una cadena de rodillos.



Figura 1.35: Cadena de rodillos [20].

Las tres dimensiones básicas para el diseño de una cadena de rodillos son el paso, el diámetro del rodillo y el ancho interior, estas deben coincidir con las dimensiones de las ruedas dentadas para lograr engancharse (Figura 1.36).

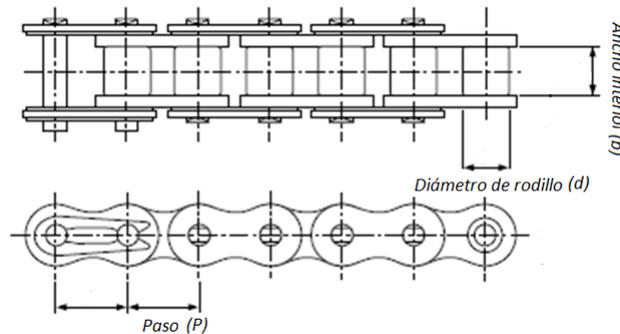


Figura 1.36: Dimensiones importantes de una cadena [20].

Las cadenas pueden ser clasificadas de diferentes formas, una de ellas es dependiendo de la aplicación para la cuales son destinadas:

- **Cadenas de transmisión de potencia:** cuya aplicación es transmitir la potencia entre ejes que giran a unas determinadas velocidades [20].
- **Cadenas de manutención:** o también llamadas cadenas transportadoras. Son un tipo de cadenas que gracias a una geometría específica de sus eslabones o enlaces le permiten desempeñar una función de transporte o arrastre de material [20].
- **Cadenas de carga:** o también llamadas de bancos de fuerzas. Son cadenas que permiten transmitir grandes cargas y son usadas, por ejemplo, para elevar grandes pesos o para accionar bancos de fuerza, entre otros usos [20].

Capítulo 2

Diseño conceptual

2.1. Enfoque DCU-QFD

Como se mencionó en el capítulo anterior, uno de los errores más comunes en el diseño de nuevos productos es no tomar en cuenta la opinión de los clientes o usuarios finales. Para evitar ello, uno de los métodos utilizados para incluir a los clientes o usuarios finales es utilizar el enfoque DCU haciendo uso de herramientas o técnicas en las que se involucra a los usuarios. Para poder aplicar estas herramientas es necesario contar con personas que encajen en el perfil de usuario definido. Se requiere para este caso en particular, que cuenten con las siguientes características:

- Ser adultos usuarios de sillas de ruedas manuales.
- Tener movilidad en ambas manos.
- Ser capaces de impulsarse por sí mismos utilizando el método de propulsión convencional.

Una vez definidas las características de los usuarios a los cuales va dirigido el dispositivo diseñado, se buscaron instituciones que pudieran proporcionar el contacto con personas que encajaran en el perfil de usuario. Se consiguió el apoyo de la asociación Vida Independiente México A.C. (ubicada en Calle Balboas 85, Simón Bolívar, 15410 Ciudad de México), dedicada a la integración social y laboral de personas con discapacidad mediante rehabilitación física y psicológica, cursos de capacitación de manejo de sillas de ruedas con una duración de 3 a 4 meses y a la inculcación de una filosofía de vida con el fin de lograr una vida

independiente. Se logró tener la cooperación del grupo de verano 2015, que se encontraba en un curso de capacitación de manejo de silla de ruedas ya que todos ellos cumplían con el perfil de usuario.

2.1.1. Observación

Se observó interactuar un grupo de diez usuarios con su silla de ruedas, durante un periodo de dos horas en las que ellos se impulsaban con el método de propulsión convencional en distintas situaciones (en terreno plano, terreno con irregularidades, al subir y bajar banquetas y rampas). Esto con el fin de poder identificar las necesidades de los usuarios, conocer mejor la interacción con el método de propulsión convencional y detectar maneras de mejorar el movimiento y dispositivo de propulsión. En esta etapa se identificó lo siguiente:

- La dificultad que representa subir rampas prolongadas (puentes peatonales) y pendientes con una inclinación mayor al 12 %, establecida en la NOM-233-SSA1-2003.
- La necesidad de un sistema que facilite a los usuarios subir rampas.
- La cantidad de impulso utilizando el MPC muchas veces les era insuficiente por lo que recurrían al agarre del aro y llanta juntos para tener mayor impulso.
- La mayoría de los usuarios no tenían conocimiento de la técnica correcta para propulsarse con el método de propulsión convencional, ya que se observó malas posturas durante la propulsión.

2.1.2. Encuestas

Debido a su simplicidad, rapidez de aplicación y eficacia en la obtención de información, otra de las herramientas utilizadas fue la encuesta, para conocer mejor a los usuarios (necesidades, requerimientos, sugerencias).

Se tomaron en cuenta recomendaciones para hacer investigación de mercado mediante encuesta o cuestionario de [96], tratando de que el cuestionario diseñado fuera sencillo, preciso, discreto e interesante para los usuarios, que la estructura de las preguntas siguiera una secuencia lógica para no confundir al encuestado. Se determinó la información necesaria que se quería obtener y acorde

con esta se estructuraron y seleccionaron preguntas sencillas para que los usuarios no tuvieran problemas para contestarlas.

El cuestionario (Apéndice A) incluyó preguntas abiertas como ¿Qué es lo que le gustaría mejorar al método de propulsión convencional?, preguntas acotadas con las posibles respuestas de interés, y preguntas jerarquizadas donde los usuarios tenían que ordenar diferentes opciones dependiendo de la importancia que ellos consideraban. El cuestionario se aplicó a un grupo de diez usuarios, todos con las características requeridas por el perfil de usuario. La información obtenida se resume a continuación.

Características recomendadas para mejorar del método de propulsión convencional

- **Impulso.** En el sistema convencional se tiene poco impulso, ya que los usuarios suelen agarrar no sólo el aro de propulsión sino también la llanta, lo que lleva a que se ensucien las manos y puedan tener lesiones por fricción como quemaduras o raspaduras.
- **Cantidad de fuerza** necesaria para subir rampas.
- **Sistema de bloqueo.** No se tiene forma de bloquear las ruedas mientras se sube, por lo que es inseguro.
- **Adaptabilidad ergonómica.** Que los aros se adapten a la forma de la mano y cambiar la manera en que los aros se anclan a la rueda.
- **Ventaja mecánica.** Que se pueda avanzar más con el impulso proporcionado por el usuario.
- **Volumen del aro.** En ocasiones no es posible pasar a través de puertas o espacios reducidos.

Características que los usuarios recomendaron para el nuevo método de propulsión

- Fácil de operar, es decir, que se propulse con poco esfuerzo y habilidad.
- Que les permita realizar sus actividades diarias.

- Que se pueda adaptar a la antropometría del usuario.
- Proporcionar mayor impulso (Ver Tabla 2.1).
- Reducir la fuerza necesaria para impulsarse (Ver Tabla 2.1).
- Disminuir el espacio adicional en el exterior de la llanta utilizado por el dispositivo.

Una parte importante en la etapa de recolección de información, se realizó al entrevistar y encuestar a un médico cirujano y un licenciado en terapia física. Ambos trabajadores de la institución *Vida Independiente México*, donde son encargados de capacitar y dar tratamiento médico a personas en sillas de ruedas. La información proporcionada por los dos especialistas es de suma importancia debido a los años de experiencia que tienen en el trato con personas que usan sillas de ruedas, esta información se resume en los siguientes puntos:

- La mayoría de las personas que necesitan una silla de ruedas está en edad para trabajar, entre 15 y 50 años, por lo que es importante contar con un dispositivo adecuado que permita a los usuarios desplazarse e incluirse activamente en la sociedad.
- Una forma para reducir los efectos secundarios causados por el MPC y evitar el desgaste en articulaciones es conocer la técnica correcta de propulsión, la cual involucra el uso de la parte media del cuerpo y no solo los brazos.
- La mayoría de personas que tienen efectos secundarios en miembros superiores, son personas de edad avanzada que nacieron con discapacidad para caminar o la adquirieron a temprana edad, ya sea por accidente o enfermedad.
- Realizar deportes en silla de ruedas, podría ser una causa de los efectos secundarios de utilizar el MPC, debido a que aumenta la exigencia física en los miembros superiores.
- Una de las dificultades más importantes para las personas en sillas de ruedas que utilizan el MPC, es la dificultad que representa el subir pendientes o rampas, debido a la carga física que representa y a la fase de recuperación que tiene el movimiento, ya que es necesario soltar el aro de propulsión, lo cual implica la posibilidad de que la silla retroceda sin que el usuario lo desee.

2.1.3. Obtención de los requerimientos de diseño

En las encuestas se colocó un apartado en el cual los usuarios jerarquizaron las cinco características más importantes (pregunta 18 del Apéndice A), asignándoles una calificación del 1 al 5, siendo el 1 el de mayor importancia y 5 el menos importante. La Tabla 2.1 muestra las características así como las respuestas de los encuestados.

Tabla 2.1: Jerarquización de características hechas por los usuarios.

	Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	Usuario 4	Usuario 5	Especialista 1	Especialista 2
Tamaño	3	1	3	1		3	1
Peso	2		1		3	4	2
Fuerza empleada		5			1		
Facilidad de uso	5	4				5	
Adaptabilidad				3			
Instalación		3		4	4	2	5
Mantenimiento				5	5		
Seguridad	4	2	4		2		
Maniobrabilidad			5				3
Costo y accesibilidad	1		2	2		1	4

Nota: De las encuestas aplicadas sólo se tomaron en cuenta, para este apartado, las siete que se contestaron correctamente al apartado de la pregunta 18 del Apéndice 1, ya que algunos no ordenaron las cinco características más importantes para ellos, seleccionando más de cinco características y dándoles el valor de mayor importancia a cada una de ellas, repitiendo números. Se consideró que este número es suficiente debido a que no es necesaria una alta precisión, además de que todos los encuestados encajaban con el perfil de usuario.

Como se puede observar en el Tabla 2.2, los valores que más se aproximan a 1 son los valores de las características más importantes según la muestra de usuarios y especialistas seleccionada. Tomando en cuenta sólo las 6 características más importantes, se determina el porcentaje, sin tomar en cuenta las otras, para finalmente obtener la importancia en porcentaje de esas seis (columna Porcentaje de importancia, de la Tabla 2.2).

Tabla 2.2: Importancia de las características y porcentaje de importancia de las 6 más importantes

	Importancia	Porcentaje de importancia
Tamaño	0.57	28 %
Costo y accesibilidad	0.46	23 %
Peso	0.36	18 %
Instalación	0.21	11 %
Seguridad	0.21	11 %
Fuerza empleada	0.17	9 %
Facilidad de uso	0.12	-
Maniobrabilidad	0.07	-
Mantenimiento	0.05	-
Adaptabilidad	0.04	-
		100 %

Nota: haciendo la suma de los inversos de cada una de las características, y dividiéndola entre el número de encuestas tomadas en cuenta, se obtiene la columna de importancia, que se encuentra en una escala de 0 al 1. La columna de porcentaje de importancia se obtiene considerando solo las seis características con valor más alto en la columna de Importancia.

2.1.4. Aplicación de la casa de la calidad y obtención de características técnicas de diseño

Para la aplicación de la casa de la calidad es necesario tener información sobre los clientes y su opinión en lo que se llama la *voz del cliente*, que se ve plasmada en los requerimientos o los *qué* que los usuarios determinaron mediante la información en las encuestas. Una vez determinada esta parte de la matriz, es posible determinar la siguiente parte que se conforma de los *cómo* que son las formas de alcanzar los *qué* o requerimientos de los usuarios mediante características técnicas medibles relacionados con los requerimientos [93]. Los resultados de la matriz QFD se integran en la Casa de la Calidad que se muestra en la Tabla 2.3.

Como se puede observar en la casa de la calidad resultante, se tienen los requerimientos e importancia obtenidos de las encuestas así como las características técnicas que se consideraron necesarias para poder cumplir con tales requerimientos. Se realizó una estimación para determinar el nivel de relación entre las características técnicas y los requerimientos de los usuarios, para determinar la importancia o peso de las características técnicas necesarias para el proceso de selección de propuestas. La importancia de los *cómo(s)* se determinó mediante la suma de la multiplicación del valor estimado (nivel de relación) por el valor de la importancia relativa dada por los usuarios (Ecuación (2.1)).

$$\text{Importancia de los cómo} = \Sigma(\text{valor estimado de la relación}) \times (\text{importancia del qué}) \quad (2.1)$$

Posteriormente se determina la importancia en porcentaje de cada característica técnica dividiendo la importancia obtenida anteriormente entre la suma de los valores de importancia (Ecuación (2.2)).

$$\text{Porcentaje de importancia} = \frac{\text{valor de importancia del cómo}}{\Sigma(\text{Total de valores de importancia de los cómo})} \quad (2.2)$$

Tabla 2.3: Casa de la calidad

	Importancia de los qué(s)	Factor de seguridad	Número de elementos en el mercado	Número de elementos a manufacturar	Ventaja Mecánica	Volumen total del dispositivo	Peso total del dispositivo	Fuerza necesaria para impulsarse	Número de movimientos para impulsarse	Número de herramientas necesarias para instalar/desinstalar	Número de grados de libertad restringidos	Tiempo requerido para instalar/desinstalar	Fuerza requerida para frenar
Voz del cliente													
Tamaño	0.28	3	0	0	3	9	6	3	0	0	3	3	6
Costo y accesibilidad	0.23	3	9	9	0	6	6	0	0	6	0	0	0
Peso	0.18	3	0	0	0	6	9	3	0	0	0	6	9
Fuerza empleada	0.11	0	0	0	9	9	9	9	6	0	0	6	9
Seguridad	0.11	9	6	6	6	3	3	6	3	0	3	3	9
Instalación	0.09	0	0	0	0	6	6	0	0	9	0	9	0
Importancia de los cómo(s)		3.06	2.73	2.73	2.49	6.84	6.54	3.03	0.99	2.19	1.17	3.72	5.28
Porcentaje de importancia		8%	7%	7%	6%	17%	16%	7%	2%	5%	3%	9%	13%

2.2. Generación de conceptos mediante herramientas TRIZ

Para la generación de conceptos se utilizó el diagrama de funciones de la Figura 2.1, el cual permitió comprender mejor el funcionamiento de una silla de ruedas y conocer los principales elementos y sistemas que la componen, así como las interacciones entre cada uno de ellos.

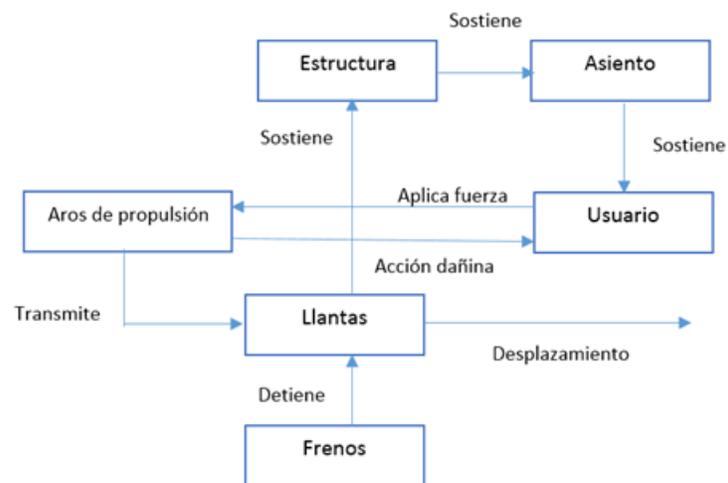


Figura 2.1: Diagrama de funciones para una silla de ruedas.

Analizando el diagrama de relación durante la propulsión, se evalúan las funciones de los diferentes elementos, generándose la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Elementos y funciones básicas para una silla de ruedas.

Elemento	Acción	Objeto	Tipo de función	Evaluación de función
Estructura	Sostiene	Asiento	Función básica	Satisfactoria
Asiento	Sostiene	Usuario	Función básica	Satisfactoria
Usuario	Aplica fuerza	Aros de propulsión	Función básica	Satisfactoria
Aros de propulsión	Transmite fuerza Efectos secundarios	Llantas Usuario	Función básica Dañina	Insuficiente
Llantas	Sostiene Desplazan	Estructura, usuario Silla	Función básica Función básica	Satisfactoria Insuficiente
Frenos	Detienen	Llantas	Función auxiliar	Satisfactoria

Nota: Una función básica es aquella función que es necesaria para el funcionamiento del sistema.

Como se puede observar en la Tabla 2.4 se tienen dos funciones básicas que son insuficientes, la transmisión de fuerza de los aros hacia las llantas y el desplazamiento realizado por las mismas. Lo cual brinda dos problemas a resolver y que se pueden atacar para generar el nuevo sistema de propulsión.

2.2.1. Las nueve ventanas

Esta técnica o metodología se utilizó para una mejor comprensión del problema así como para tener una mejor perspectiva que pudiera ayudar a la generación de posibles soluciones. Permite representar un sistema desarrollado mentalmente con la aplicación de mínimo nueve ventanas utilizando el tiempo y espacio como variables a seguir. Como espacio se considera el sistema y sus conjuntos, super sistema y subsistema, mientras que para el tiempo se tiene el pasado, presente y futuro. En la Figura 2.2 se observa la representación mediante las nueve ventanas del sistema o método de propulsión convencional [97].

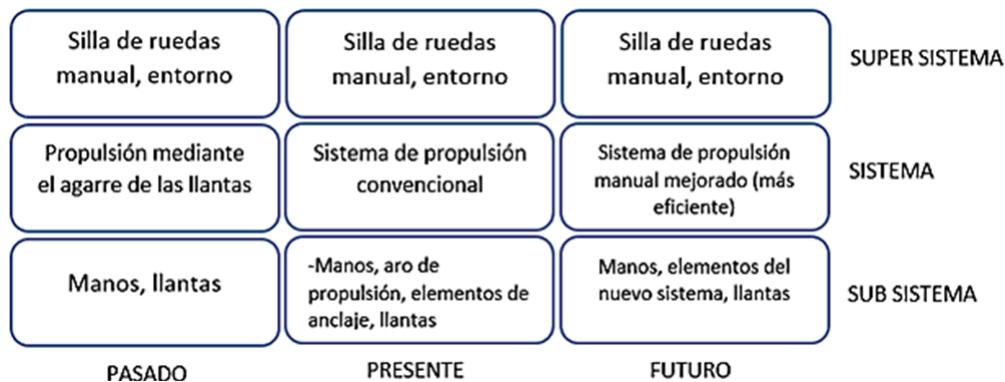


Figura 2.2: Representación de las nueve ventanas para el sistema de propulsión de una silla de ruedas.

Como se observa en la Figura 2.2, en el centro se tiene el presente sistema de propulsión convencional, en las columnas o ventanas de la izquierda se tiene el pasado, en el cual los usuarios se propulsaban agarrando las llantas de las sillas de ruedas, así como su respectivo super sistema y subsistema. Las ventanas de la derecha representan el futuro en el cual se cuenta con el nuevo sistema de propulsión mejorado.

2.2.2. Matriz de contradicciones y los 40 principios

Los 40 principios son la herramienta más popular de la teoría TRIZ, para aplicarlos es necesario tener una o varias contradicciones técnicas que definan el problema que se va a atacar, siendo una contradicción técnica aquella que se presenta cuando se desea mejorar algún parámetro o aspecto de un sistema, pero al hacerlo, algún otro parámetro del sistema empeora. Posteriormente, utilizando la matriz de contradicciones se encuentran los principios recomendados para solucionar la contradicción que se tiene [97].

Lo más recomendable es tener varias contradicciones técnicas con ayuda de los 39 parámetros recomendados en TRIZ, los cuales se relacionan con los 40 principios a través de la matriz de contradicciones. Los parámetros utilizados en este trabajo, para determinar las contradicciones técnicas utilizadas para la aplicación de esta herramienta de TRIZ son los mostrados en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5: Contradicciones técnicas utilizadas.

Parámetros	
Mejoran	Empeoran
Durabilidad de un objeto en movimiento (15)	Peso de un objeto en movimiento (1)
Desperdicio de energía (22)	Volumen de un objeto en movimiento (7)
Efectos secundarios dañinos (31)	Complejidad de un mecanismo (36)

Nota: los números en las columnas hacen referencia al número de parámetro establecido por la técnica.

En la Tabla 2.5 se tienen las distintas contradicciones técnicas utilizada, la técnica de los 40 principios recomienda algunos principios aplicables para poder encontrar posibles soluciones a las contradicciones técnicas. Posteriormente se utilizó la matriz de contradicciones [27] (Apéndice B), ubicando en las filas el número del parámetro que mejora y en las columnas el número del parámetro que empeora, en la intersección de estos se encuentran los números de los principios que la técnica recomienda para resolver la contradicción técnica.

Todos los principios recomendados utilizando las tres contradicciones técnicas ocupadas se enlistan a continuación:

- Principio 1.- Segmentación

- Principio 5.- Combinando
- Principio 7.- Anidación
- Principio 18.- Vibración mecánica
- Principio 19.- Acción periódica
- Principio 23.- Retroalimentación
- Principio 31.- Uso de material poroso
- Principio 34.- Restauración y regeneración de partes
- Principio 37.- Expansión térmica

Cabe mencionar que los principios enlistados anteriormente, son los recomendados por el método para la generación de soluciones o conceptos, según las restricciones técnicas que se consideraron. Sin embargo, algunos de estos no fueron de ayuda para el problema, los principales que resaltaron en la generación de conceptos fueron los siguientes:

Principio 1 Segmentación, que consiste principalmente en aplicar las siguientes acciones:

- (a) Divida un objeto en partes independientes.
- (b) Cree un objeto seccionado.
- (c) Incremente un grado la segmentación del objeto.

Con el principio de segmentación se crearon soluciones en las que se agregaron más elementos al método de propulsión utilizando partes independientes como palancas, transmisiones por cadena, etc.

Principio 5 Combinando

- (a) Combine en un espacio objetos homogéneos u objetos destinados a operar contiguamente.
- (b) Combine en tiempo operaciones homogéneas o contiguas.

Utilizando el principio de combinación se lograron propuestas de solución en las que se combina una serie de elementos como por ejemplo, un mecanismo de cuatro barras combinado con un sistema de transmisión por cadena para funcionar contiguamente.

Principio 7 Anidación

- (a) Contener el objeto dentro de otro que al final esté contenido en un tercer objeto.
- (b) Un objeto pasa por la cavidad de otro objeto.

Este principio va relacionado con hacer uso de espacios que no se ocupan en la silla de ruedas, como por ejemplo el espacio entre la rueda y la silla o el espacio debajo del asiento para contener el dispositivo de propulsión.

Principio 19 Acción periódica

- (a) Remplace una acción continua con una periódica, un impulso o viceversa.
- (b) Si una acción es periódica, cambie su frecuencia.
- (c) Use pausas entre impulsos para dar acción adicional.

En el caso de este principio, la acción de propulsión utilizada por el MPC es periódica, por lo que es posible utilizar este principio para sustituir una acción periódica por una acción continua, la cual elimina la fase de recuperación del movimiento y se tendría un movimiento continuo.

Con ayuda de los principios mencionados se hicieron varias propuestas conceptuales para el diseño del nuevo sistema mecánico de propulsión. En total se logro obtener 19 propuestas conceptuales, las cuales se llevaron a la fase de selección.

2.3. Selección de conceptos

Después de la generación de ideas y conceptos para el nuevo sistema de propulsión es necesaria una fase de selección en la que se reduzca el número de propuestas. Se determinó seleccionar las 3 mejores propuestas y en base a una matriz de decisión, estas tres propuestas seleccionadas fueron más detalladas.

2.3.1. Matriz de decisión

Para la selección de los mejores conceptos se utilizaron las características técnicas y con sus respectivos porcentajes de importancia, obtenidos mediante la aplicación de la casa de la calidad (Tabla 2.3), éstas son:

- Volumen total del dispositivo (17%)
- Peso total del dispositivo (16%)
- Fuerza requerida para frenar (12%)
- Tiempo requerido para instalar/desinstalar (9%)
- Factor de seguridad (8%)
- Número de elementos en el mercado (7%)
- Número de elementos a manufacturar (7%)
- Fuerza necesaria para impulsarse (7%)
- Ventaja mecánica (6%)
- Número de herramientas necesarias para instalar/desinstalar (5%)
- Número de grados de libertad restringidos (3%)
- Número de movimientos para impulsarse (2%)

Se enumeraron las 19 propuestas conceptuales llamándolas C1, C2, C3 hasta C19. Posteriormente se realizó la evaluación de todas las propuestas, presentada en la Tabla 2.6, realizando una estimación para cada una de las características técnicas, utilizando una escala de 9=bueno, 6=regular y 3=malo.

Tabla 2.6: Tabla de evaluación de propuestas conceptuales.

	Importancia	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19		
Factor de seguridad	0.08	6	6	9	9	9	9	9	6	9	6	6	9	6	6	6	9	9	9	6	9	
Número de elementos en el mercado	0.07	6	6	9	6	9	9	9	6	6	6	6	6	6	6	6	9	6	9	6	6	
Número de elementos a manufacturar	0.07 %	6	6	9	6	9	9	9	6	6	6	9	6	6	9	3	9	6	9	6	6	
Ventaja Mecánica	0.06	9	9	6	6	6	9	9	9	9	9	9	6	9	6	6	6	6	6	9	6	
Volumen total del dispositivo	0.17	9	9	3	6	6	3	6	3	6	3	3	9	6	6	3	6	6	9	9	9	
Peso total del dispositivo	0.16	9	9	6	9	6	3	6	6	6	3	6	9	9	9	6	9	9	9	9	9	
Fuerza necesaria para impulsarse	0.07	9	9	6	9	6	6	9	9	9	9	9	6	9	9	9	9	9	6	9	6	
Número de movimientos para impulsarse	0.02	6	6	6	9	9	6	6	9	6	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	6	
Número de herramientas necesarias para instalar/desinstalar	0.05	9	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	9	6	9	6	9	6	9	9	9	
Número de grados de libertad restringidos	0.03	9	9	9	9	9	9	9	6	9	6	6	6	6	6	6	9	9	9	9	9	
Tiempo requerido para instalar/desinstalar	0.09	3	6	6	6	6	6	3	6	6	6	6	9	9	9	6	9	9	6	9	6	
Fuerza requerida para frenar	0.13	6	6	6	6	6	3	6	6	6	9	9	6	9	6	9	6	6	6	6	9	
I	7.31	7.44	6.21	7.05	6.78	6.78	5.52	6.60	5.91	6.69	5.82	6.60	7.67	7.56	7.34	5.91	7.88	7.62	8.06	8.09	8.06	8.09

En la Tabla 2.6 es posible observar las propuestas mejor evaluadas. Se seleccionaron tres propuestas que fueron las mejor evaluadas; debido a que la evaluación obtenida por las tres propuestas se aproximaba demasiado, no era conveniente descartarlas sin analizar las posibles ventajas y desventajas de cada una de ellas. En las Figuras 2.3, 2.4 y 2.5 se presentan las tres propuestas conceptuales mejor evaluadas y se describen con mayor detalle en el siguiente apartado.

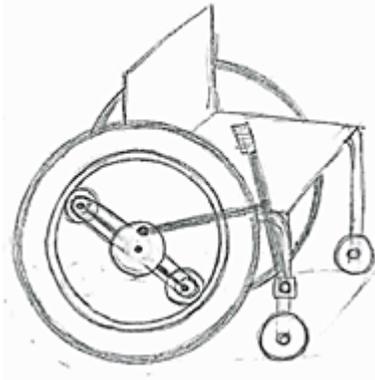


Figura 2.3: Propuesta conceptual C16.

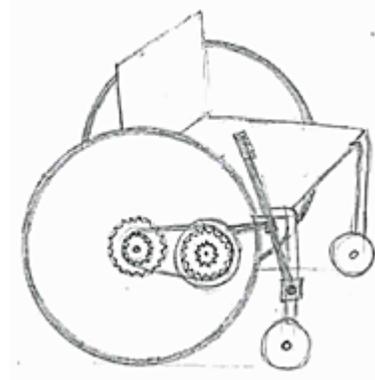


Figura 2.4: Propuesta conceptual C18.

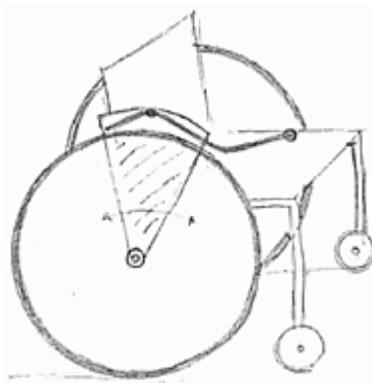


Figura 2.5: Propuesta conceptual C19.

2.3.2. Conceptos seleccionados

En las Tablas 2.7, 2.8 y 2.9 se hace la descripción de las tres propuestas seleccionadas, así como las posibles ventajas y desventajas de cada una de ellas.

Tabla 2.7: Descripción, ventajas y desventajas del concepto 1 (C16).

<p>Concepto 1: Este concepto consta de una palanca anclada a la estructura de la silla de ruedas, la cual el usuario mueve hacia adelante y hacia atrás. La palanca se encuentra conectada al extremo de un elemento barra la cual se encuentra conectada por el otro extremo a un disco acoplado al eje de la llanta, dicho disco es concéntrico con una mariposa principal, que mediante una cadena transmite a mariposas secundarias acopladas con dos ruedas de fricción en contacto con el aro de propulsión (funcionando muy similar a un sistema de engranes planetario). Este concepto tiene un sistema de bloqueo de giro, que permite el giro en un sólo sentido así como el cambio en la dirección de giro ubicado en el disco de transmisión.</p>	
ventajas	desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Movimiento continuo. ▪ Aplicación continua de fuerza. ▪ Elimina posiciones incómodas para el usuario. ▪ Rápida instalación sin necesidad de modificaciones en la silla. ▪ Proporciona ventaja mecánica. ▪ Es desmontable, por lo que se tiene la libertad del aro de propulsión cuando no esté montado. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Necesita un buen coeficiente de fricción entre las ruedas y el aro de propulsión. ▪ Espacio utilizado al exterior de la llanta. ▪ Mecanismo con complejidad moderada. ▪ Debido a que se necesita un buen coeficiente de fricción entre las ruedas y el aro de propulsión, el dispositivo podría tener deslizamiento en condiciones lluviosas. en consecuencia no se podría propulsar bien. ▪ Gran parte de los elementos se tendrían que manufacturar. ▪ En espacios reducidos la movilidad utilizando este sistema de propulsión se vería reducida

Tabla 2.8: Descripción, ventajas y desventajas del concepto 2 (C18).

<p>Concepto 2: El segundo concepto tiene elementos similares al concepto anterior, como lo es la palanca, el elemento barra y el disco donde se acopla. La diferencia está en que se tiene un sistema de transmisión por cadena y mariposas, muy similar al sistema utilizado en las bicicletas. Se acoplan mariposas en el eje de la llanta, mientras que el otro conjunto de mariposas está acoplado al disco de transmisión que gira debido al movimiento de la palanca. También cuenta con el sistema de bloqueo y cambio del sentido de giro.</p>	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Movimiento continuo. ▪ Aplicación continua de fuerza. ▪ Sistema de bloqueo. ▪ Rápida instalación sin necesidad de modificaciones en la silla. ▪ Proporciona ventaja mecánica variable. ▪ Útil para cuando es necesario subir una rampa, o desplazarse distancias largas. ▪ Elimina posiciones incómodas para el usuario. ▪ Utiliza varios elementos disponibles en el mercado ▪ Pocos elementos a manufacturar Se puede utilizar el aro de propulsión si no se quiere utilizar el dispositivo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Para instalarse es necesario desmontar las llantas. ▪ Mecanismo con complejidad moderada. ▪ Se agregaría peso adicional a la silla de ruedas ▪ En espacios reducidos la movilidad utilizando este sistema de propulsión se vería reducida

Tabla 2.9: Descripción, ventajas y desventajas del concepto 3 (C19).

<p>Concepto 3: El último concepto elegido es un concepto sencillo, con pocos elementos que consta de una placa o lámina delgada acoplada al eje de la llanta con la libertad de girar. En la parte superior de la placa se tiene un pivote conectado con una varilla utilizada como palanca que al subir o bajar permite el contacto con la llanta y debido a la libertad de giro que se tiene es posible impulsar la silla de ruedas.</p>	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ocupa poco espacio ▪ Rápida instalación sin necesidad de modificaciones en la silla ▪ Elimina posiciones incómodas para el usuario ▪ Utiliza pocos elementos, sin geometrías complicadas lo que facilitaría su manufactura. ▪ Su adaptabilidad para la mayoría de sillas de ruedas sería alta 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Necesita buen coeficiente de fricción entre la llanta y el elemento de contacto ▪ Al hacer contacto con la llanta, si esta está girando, frena la silla perdiendo impulso ▪ No proporciona mayor ventaja mecánica que el método de propulsión convencional ▪ Debido a que se necesita un buen coeficiente de fricción entre el elemento de contacto y la llanta, el dispositivo podría tener deslizamiento en condiciones lluviosas. en consecuencia no se podría impulsar bien.

De la información presentada en las Tablas anteriores, es claro que la propuesta con mayores ventajas y menores desventajas es la propuesta 2. Las propuestas 1 y 3 presentan un mayor número de desventajas, relacionadas en su mayoría con que son dispositivos de fricción, por lo cual constantemente se necesitaría tomar en cuenta que los materiales en contacto para la transmisión de movimiento mantengan un coeficiente de fricción necesario para que no exista deslizamiento, e impida la transmisión de la fuerza. Además de que se tendría que impedir la inserción de algún elemento entre las superficies de contacto (agua, polvo, etc.), lo cual involucraría realizar mantenimiento con mayor frecuencia para eliminar los elementos que se hayan introducido entre las superficies que pudieran afectar en su funcionamiento. Mientras que el sistema de la propuesta 2, transmite la fuerza mediante el uso de una transmisión por cadena, que es una de las formas más eficientes de transmitir el torque generado, es robusta, es capaz de soportar condiciones adversas tanto ambientales como de trabajo. Con base a lo anterior, la propuesta seleccionada para pasar a la fase de diseño de detalle es la número 2.

Capítulo 3

Diseño de detalle

La fase de diseño de detalle es una de las etapas de más importancia para obtener un buen producto, sin embargo, un buen diseño de detalle no es capaz de salvar una mala propuesta conceptual, es por ello que se debe poner atención tanto en la fase conceptual como en la de detalle para lograr un diseño exitoso.

En este apartado se realiza el diseño detallado de los subsistemas y los componentes que integran el dispositivo de propulsión. Algunos de estos componentes ya se encuentran definidos en menor grado desde la fase conceptual, como lo es la utilización de cadena y mariposas o el uso de una palanca; en esta fase se definen con precisión características como las dimensiones, geometría, material, etc.

La propuesta para el sistema de propulsión se compone de una palanca conectada a una mariposa (rueda dentada), mediante elementos rígidos, esta a su vez transmite el par de torsión a través de una cadena hacia la rueda principal y finalmente para detener el giro se utilizan elementos de fricción accionados por medio de un cable. Es posible identificar tres subsistemas que en conjunto componen el dispositivo, estos son:

- **Sistema de cuatro barras.** Lo componen principalmente la palanca que conecta con el sistema de transmisión por cadena mediante un elemento rígido para transmitir la fuerza que produce el usuario al empujar o jalar la palanca.
- **Sistema de transmisión por cadena.** Realiza la transmisión de la fuerza del usuario a la rueda, mediante una cadena y *sprockets* o mariposas.

- **Sistema de frenado.** Su función es evidente, detener el giro de las ruedas mediante elementos de fricción similares a los utilizados en las bicicletas.

El proceso de diseño de detalle de cada uno de estos mecanismos se realiza por separado para finalmente integrarlos y obtener el diseño completo.

3.1. Subsistema de cuatro barras

En este apartado se realiza la *síntesis dimensional* del mecanismo de cuatro barras utilizado, obteniendo las dimensiones de cada uno de los eslabones que lo componen. Posteriormente se realiza el *análisis*, para verificar que el funcionamiento del mecanismo sea el que se estableció en la fase de síntesis.

3.1.1. Síntesis dimensional

La propuesta seleccionada utiliza un mecanismo plano de 4 barras y un grado de libertad, teniendo una entrada que es la fuerza proporcionada por el usuario utilizando la palanca y una salida que es el torque producido en la rueda dentada que actúa como eslabón de salida del mecanismo. La palanca realiza un movimiento de vaivén, actuando como un balancín, conectada al elemento de salida mediante un eslabón de unión para tener un movimiento circular de salida, transformando el movimiento de balanceo a un movimiento de rotación, como se puede observar en el la Figura 3.1.

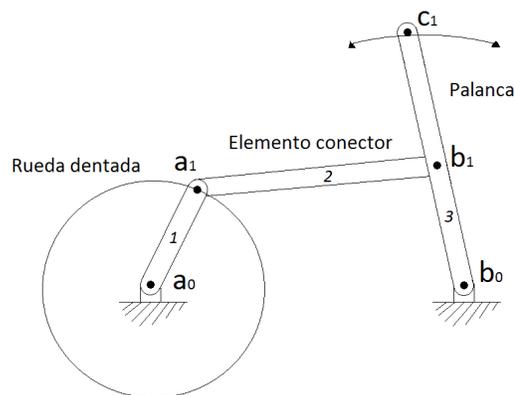


Figura 3.1: Diagrama del mecanismo de cuatro barras utilizado.

Este mecanismo, a través de la palanca, es capaz de proporcionar ventaja mecánica; es decir, proporciona apoyo al usuario disminuyendo la fuerza necesaria para propulsarse, que es una de las características que los usuarios y especialistas identificaron como importante para el dispositivo, ya que multiplica la fuerza de entrada por un factor que depende de las longitudes utilizadas; además, la ventaja mecánica disminuye el esfuerzo necesario para subir pendientes facilitando esta tarea a los usuarios, que también es otra de las características importantes para el dispositivo.

Para poder determinar las dimensiones de los eslabones del mecanismo se hizo la síntesis del mecanismo. Para facilitar la síntesis del mecanismo, se realizó una simplificación del diagrama cinemático, en la que se elimina la sección de la palanca del punto b_1 al punto c_1 , transfiriendo la fuerza que el usuario aplica en el extremo de la palanca c_1 , al punto b_1 . El diagrama cinemático simplificado se muestra en la Figura 3.2, así como los ángulos de cada eslabón, el ángulo inicial para la palanca y la fuerza del usuario trasladada al punto b_1 .

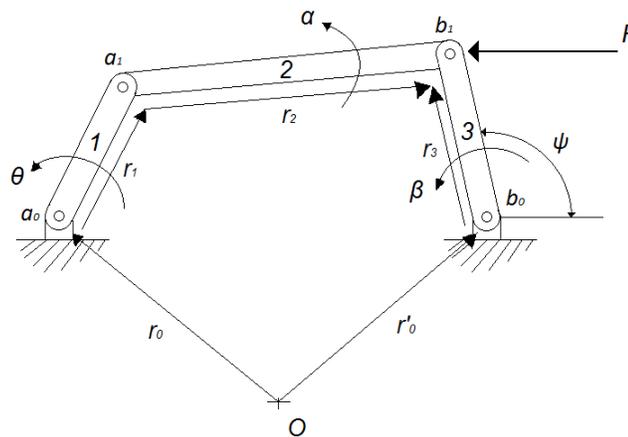


Figura 3.2: Diagrama cinemático del mecanismo de 4 barras simplificado.

Tomando en cuenta las dimensiones de las sillas de ruedas estándar, en específico de la parte donde se acoplará el dispositivo a la silla de ruedas, entre el eje de la rueda principal y la estructura tubular de la silla, se identifica una longitud de entre 0.4 y 0.65 metros. Se seleccionaron las coordenadas en x y y del

punto b_0 , consideradas como b_{0x} y b_{0y} , así como la coordenada a_{0y} del punto a_0 , dejando como incógnita la coordenada a_{0x} para no limitar las posibles soluciones, por lo que:

$$a_0 = (a_{0x}, a_{0y}) = (a_{0x}, 0)$$

$$b_0 = (b_{0x}, b_{0y}) = (0.5, 0)$$

Así mismo, las coordenadas de los puntos a_1 y b_1 son incógnitas:

$$a_1 = (a_{1x}, a_{1y})$$

$$b_1 = (b_{1x}, b_{1y})$$

El ángulo de la palanca con respecto a la horizontal es ψ y puede variar durante el proceso de síntesis (ver Figura 3.2). El movimiento de vaivén de la palanca se realiza en un ángulo β (ver Figura 3.2). Para la síntesis se consideraron tres puntos, el primero es el punto inicial dado por el ángulo inicial de la palanca ψ y el ángulo inicial del eslabón de salida θ (ver Figura 3.2). El segundo punto se tiene cuando la palanca recorre la mitad del ángulo total establecido como β , llamado β_{12} , ángulo entre la posición inicial y la posición dos de la palanca, mientras que el tercer punto se tiene cuando la palanca recorre en su totalidad el ángulo establecido, es decir β_{13} ángulo entre la posición inicial y posición tres; a partir de aquí, la palanca regresa a la posición inicial. Por otra parte, el eslabón de salida debe realizar la mitad de giro cuando la palanca haya recorrido por completo el ángulo establecido, es decir, el ángulo entre la posición inicial y la posición tres del eslabón 1 debe ser $\theta_{13} = 180^\circ$, en consecuencia, el ángulo θ_{12} debe ser de 90° .

$$\theta_{12} = 90^\circ$$

$$\theta_{13} = 180^\circ$$

$$\beta_{12} = 20^\circ$$

$$\beta_{13} = 40^\circ$$

Posteriormente se realizó el proceso de síntesis, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Comenzar desde elementos del mecanismo donde se conozca alguna característica (puntos, ángulo, posición, etc).
- Se deben tener todos los puntos en función de los puntos iniciales.
- Todos los puntos de un mismo cuerpo deben estar relacionados entre sí.

Es importante definir elementos utilizados en las ecuaciones de síntesis. La matriz de desplazamiento plano (MDP), que involucra la rotación y traslación para determinar la posición y orientación de los elementos depende de un ángulo y dos puntos $MDP = [\delta, P1(x_1, y_1), P2(x_2, y_2)]$, donde δ es el ángulo que gira el elemento de una posición a otra y las coordenadas x_1, y_1 y x_2, y_2 son las coordenadas de las posiciones inicial y final.

$$MDP = \begin{pmatrix} \cos\delta & -\text{sen}\delta & x_2 - (x_1 \cos\delta - y_1 \text{sen}\delta) \\ \text{sen}\delta & \cos\delta & y_2 - (x_1 \text{sen}\delta + y_1 \cos\delta) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Para obtener los puntos de las posiciones dos y tres, es necesario multiplicar la matriz MDP por el vector asociado al punto inicial, con esto, es posible dejar todas las ecuaciones en términos de los puntos iniciales. Así se obtiene:

$$a_2 = MDP[\theta_{12}, a_0, a_0] \quad (3.1)$$

$$a_3 = MDP[\theta_{13}, a_0, a_0] \quad (3.2)$$

$$b_2 = MDP[\beta_{12}, b_0, b_0] \quad (3.3)$$

$$b_3 = MDP[\beta_{13}, b_0, b_0] \quad (3.4)$$

Es importante mencionar que los puntos utilizados en la matriz de desplazamiento plano son los mismos, ya que son fijos, es decir, los puntos a_0 y b_0 no cambian independientemente de la posición en que se encuentre el mecanismo. Teniendo todos los puntos en términos de los puntos iniciales, lo siguiente es, que todos los puntos de un mismo cuerpo se encuentren relacionados. Con las ecuaciones (3.1), (3.2), (3.3) y (3.4) se relacionan los puntos del cuerpo 1 con los del cuerpo 3. Sin embargo, falta relacionar los puntos del cuerpo 2, esto se hace a través de ecuaciones de cierre o de longitud constante, ya que la distancia entre sus puntos siempre debe ser la misma en cualquier posición del mecanismo. Así:

$$(a_1 - b_1) \cdot (a_1 - b_1) - (a_2 - a_2) \cdot (a_2 - b_2) = 0 \quad (3.5)$$

$$(a_1 - b_1) \cdot (a_1 - b_1) - (a_3 - b_3) \cdot (a_3 - b_3) = 0 \quad (3.6)$$

Otra característica importante que debe cumplir el mecanismo está asociada con el ángulo inicial de la palanca. Para forzar a que el elemento de la palanca tenga una inclinación inicial ψ , es necesario agregar una ecuación obtenida de la definición de la función trigonométrica *tangente*, $Tan\psi = \frac{x}{y}$, donde $x = b_{1x} - b_{0x}$ y

$y = b_{1y} - b_{0y}$. Así pues, se obtiene la ecuación de diseño (3.7) que obliga a que la palanca inicie con el ángulo ψ establecido.

$$(b_{1x} - b_{0x})\tan\psi - (b_{1y} - b_{0y}) = 0 \quad (3.7)$$

Como criterio de selección del mecanismo se utilizó una de las consideraciones importantes en la síntesis que es el ángulo de transmisión γ . Este ángulo idealmente tendría que ser 90° ; sin embargo, es difícil que el mecanismo logre tener este ángulo siempre, debido a que varía durante el movimiento del mismo, es por ello que se establece una tolerancia de $\pm 50^\circ$ para determinar si el mecanismo es aceptable. Estableciendo las siguientes condiciones:

$$\gamma_{min} \geq 40^\circ \quad (3.8)$$

$$\gamma_{max} \leq 140^\circ \quad (3.9)$$

Para encontrar la solución, es decir, las dimensiones del mecanismo de cuatro barras que cumple con las ecuaciones de restricción dadas, se realizó un programa en *Mathematica 9.0* (Apéndice C), que es un software utilizado para distintas aplicaciones matemáticas, siendo una de ellas la síntesis y análisis de mecanismos. El programa utiliza una función objetivo (FO), que busca minimizar el error total de cada restricción. La FO se compone de la suma de los errores en las ecuaciones (3.5), (3.6) y (3.7), estos son elevados al cuadrado para obtener un valor absoluto del error total.

3.1.2. Análisis

Para verificar que las dimensiones del mecanismo, que se obtuvieron en la fase de *síntesis* son las indicadas para que su funcionamiento sea el que se estableció, se realiza el análisis, obteniendo características como posición, velocidad y aceleración.

Considerando el diagrama cinemático de la Figura 3.3, se sabe que es un mecanismo de un GDL, ya que se necesita de una sola entrada para poder mover el mecanismo. Posteriormente, utilizando los vectores r asociados a cada uno de los puntos del mecanismo de la forma $r_i = (r_{ix}, r_{iy})$, se obtiene la ecuación de lazo correspondiente:

$$r_0 + r_1 + r_2 - r_3 - r_3' - r_0' = 0 \quad (3.10)$$

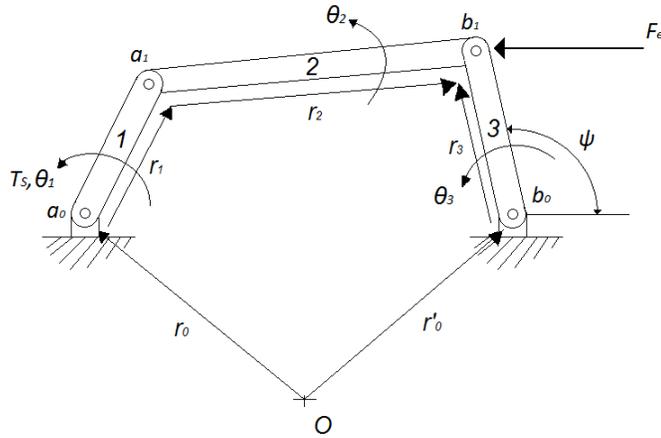


Figura 3.3: Diagrama cinemático utilizado para el análisis.

La ecuación (3.10) es una ecuación vectorial de cierre de lazo que define una sola posición del mecanismo, para obtener ecuaciones que definan cualquier posición, es necesario incluir la rotación que puede realizar cada uno de los elementos, esto se logra utilizando la matriz de rotación plana $R[\theta_i]$.

$$R[\theta_i] = \begin{pmatrix} \cos\theta_i & -\text{sen}\theta_i \\ \text{sen}\theta_i & \cos\theta_i \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Utilizando la matriz de rotación aplicada a la ecuación de lazo (3.10), se obtiene la ecuación de posición (3.12).

$$R_0 + R_1 + R_2 - R_3 - R'_0 = 0 \quad (3.12)$$

Donde:

$$R_0 = r_0$$

$$R'_0 = r'_0$$

$$R_1 = R[\theta_1]r_1$$

$$R_2 = R[\theta_2]r_2$$

$$R_3 = R[\theta_3]r_3$$

Los vectores R_1 , R_2 y R_3 , implican movimiento proporcionado por la matriz de rotación, mientras que los vectores R_0 y R'_0 son fijos, por lo que no se les aplica la matriz.

Para el análisis de velocidades se deriva la ecuación de posición, afectando a la matriz de rotación y obteniendo lo siguiente:

$$\dot{R}[\theta_i] = \begin{pmatrix} -\text{sen}\theta_i\dot{\theta} & -\text{cos}\theta_i\dot{\theta} \\ \text{cos}\theta_i\dot{\theta} & -\text{sen}\theta_i\dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\dot{\theta}_i \\ \dot{\theta}_i & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{cos}\theta_i & -\text{sen}\theta_i \\ \text{sen}\theta_i & \text{cos}\theta_i \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

Donde $\dot{\theta}$ es la velocidad angular que se denota como ω_i ; como se puede observar, aparece de nuevo la matriz de rotación y una matriz de velocidad angular $V[\omega_i]$. Al derivar la ecuación de posición es posible obtener la ecuación de velocidades (3.14):

$$V_1 + V_2 + V_3 = 0 \quad (3.14)$$

$$V[\theta_i] = \begin{pmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

$$V_1 = V[\omega_1]R_1$$

$$V_2 = V[\omega_2]R_2$$

$$V_3 = V[\omega_3]R_3$$

De manera similar, al derivar la ecuación de velocidades se obtiene una matriz de aceleración angular $A[\omega_i, \alpha_i]$ y la ecuación (3.17) para el análisis de aceleración.

$$\ddot{R}[\theta_i] = \begin{pmatrix} -\text{sen}\theta_i\ddot{\theta}_i - \text{cos}\theta_i\dot{\theta}_i^2 & -\text{cos}\theta_i\ddot{\theta}_i + \text{sen}\theta_i\dot{\theta}_i^2 \\ \text{cos}\theta_i\ddot{\theta}_i - \text{sen}\theta_i\dot{\theta}_i^2 & -\text{sen}\theta_i\ddot{\theta}_i - \text{cos}\theta_i\dot{\theta}_i^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\dot{\theta}_i^2 & -\ddot{\theta}_i \\ \ddot{\theta}_i & -\dot{\theta}_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{cos}\theta_i & -\text{sen}\theta_i \\ \text{sen}\theta_i & \text{cos}\theta_i \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

$$A_1 + A_2 - A_3 = 0 \quad (3.17)$$

$$A[\omega_i, \alpha_i] = \begin{pmatrix} -\omega_i^2 & -\alpha_i \\ \alpha_i & -\omega_i^2 \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

$$A_1 = A[\omega_1, \alpha_1]R_1$$

$$A_2 = A[\omega_2, \alpha_2]R_2$$

$$A_3 = A[\omega_3, \alpha_3]R_3$$

Utilizando las ecuaciones de posición (ecuación 3.12), velocidad (ecuación 3.14) y aceleración (ecuación 3.17), es posible determinar la posición, velocidad y aceleración de cualquier elemento del mecanismo de cuatro barras con el fin de verificar que el mecanismo cumpla con las características que se establecieron en la fase de síntesis.

3.1.3. Características del mecanismo de cuatro barras seleccionado

Para resolver las ecuaciones no lineales que se obtienen en la síntesis y análisis del mecanismo, fue necesario utilizar métodos numéricos, para ello se utilizó un programa hecho en *Mathematica 9.0*, este programa busca soluciones que cumplan con las restricciones establecidas para el sistema de 4 barras y entrega las coordenadas de los puntos a_0 , a_1 , b_0 y b_1 que determinan las longitudes de los elementos de tipo barra en el mecanismo. En base a las dimensiones deseadas para el elemento 1 del mecanismo (entre 0.05 m y 0.1 m) y la variación del ángulo de transmisión del mecanismo, se seleccionó una de las posibles soluciones entregadas por el programa, la cual cumplió con la dimensión y la variación mínima del ángulo de transmisión.

Las coordenadas para los puntos de la solución seleccionada son:

$$a_{0x} = 0.256319 \text{ m.}$$

$$a_{1x} = 0.294529 \text{ m.}$$

$$a_{1y} = 0.0519284 \text{ m.}$$

$$b_{1x} = 0.516128 \text{ m.}$$

$$b_{1y} = 0.184342 \text{ m.}$$

Con estas coordenadas se determinaron las longitudes para los elementos del mecanismo de cuatro barras que se muestran en la Figura 3.4.

Donde:

$$L_0 = 0.222 \text{ m.}$$

$$L_1 = 0.056 \text{ m.}$$

$$L_2 = 0.24 \text{ m.}$$

$$L_3 = 0.16 \text{ m.}$$

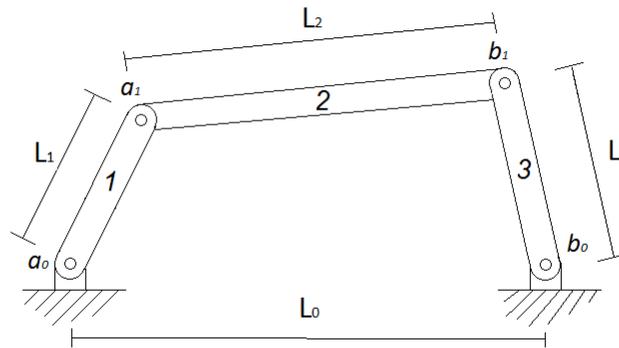


Figura 3.4: Diagrama de dimensiones del mecanismo de cuatro barras.

El ángulo de transmisión del mecanismo con las dimensiones seleccionadas se encuentra dentro del rango aceptable para los mecanismos de barras, que es entre (40° y 140°), el ángulo varía entre 44° y 86° como se muestra en la gráfica de la Figura 3.5.

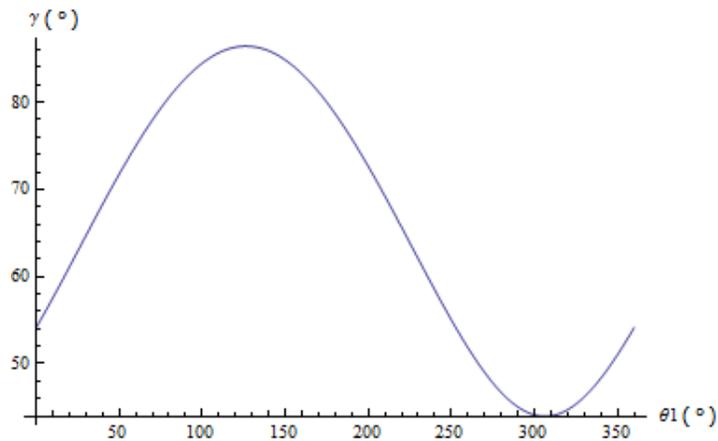


Figura 3.5: Variación del ángulo de transmisión durante un ciclo del mecanismo.

Basándose en las longitudes de la palanca en otros dispositivos del mismo tipo [98], se propuso una longitud para la palanca de 0.5 m que junto con la longitud del elemento tres del mecanismo de barras cuatro, permitió determinar la fuerza aplicada en el punto b_1 con la ventaja mecánica proporcionada por la palanca utilizando la ecuación (1.2). La fuerza utilizada como fuerza proporcionada por el usuario o de entrada, fue de 208.2 Newtons, que es la fuerza media para el

movimiento de tracción del brazo (jalar) [99], y se aplica de manera perpendicular a la palanca, por lo que la ventaja mecánica proporciona una fuerza de salida de:

$$F_s = \frac{L_e}{L_s} F_e = \frac{0.5 \text{ m}}{0.16 \text{ m}} (208.2 \text{ Newtons}) = 650.6 \text{ Newtons} \quad (3.19)$$

La ventaja mecánica proporcionada por la palanca, es la relación de longitudes utilizada, que en este caso es 0.5 m/0.16 m, obteniendo un factor de 3.125, que es el factor por el cual se multiplica la fuerza de entrada.

Posteriormente se realizó un análisis de fuerzas con el fin de determinar el torque de salida en la rueda dentada mediante el método de Newton y el método del trabajo virtual. En la posición inicial de propulsión, es decir, con un ángulo de $\psi = 85^\circ$ y aplicando la fuerza trasladada al punto b_1 obtenida en la ecuación (3.19), se determinó el torque en la rueda dentada que funciona como el elemento uno del mecanismo de cuatro barras. La gráfica de la Figura 3.6 muestra la variación del torque generado en un ciclo del mecanismo.

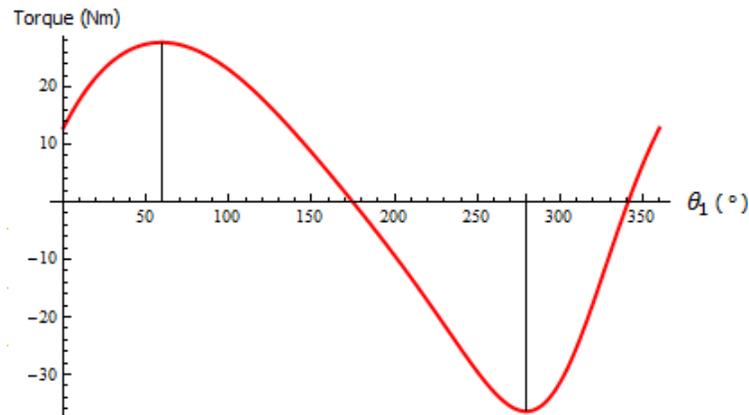


Figura 3.6: Variación del torque generado.

En la posición inicial se tiene un valor aproximado de 13 Nm llegando a superar los 30 Nm en la posición en la que el elemento 1 del mecanismo gira 280° después de la posición inicial. Esto fue uno de los puntos clave en la selección del mecanismo, ya que era necesario que el torque inicial fuera mayor a 9 Nm, que es el valor necesario para propulsarse en superficies como el concreto suave e incluso llega a compararse con el torque necesario para propulsarse en superficies como el concreto agregado, que es de alrededor de 12.5 Nm [100].

3.2. Subsistema de transmisión por cadena

Los principales elementos de una transmisión por cadena son los *sprockets* (mariposas), que son ruedas dentadas y la cadena, generalmente de rodillos [101]. Las principales características a tomar en cuenta en la selección de una cadena son:

- Potencia a transmitir.
- Fuente de potencia.
- Mecanismo a accionar.
- Número de r.p.m. de los ejes.
- Distancia entre centros de las ruedas dentadas.

Dependiendo de la potencia que se desea transmitir se determina el paso de la cadena, mediante tablas de diseño encontradas en la literatura. La potencia que un usuario de silla de ruedas promedio es capaz de generar está entre 20 y 120 Watts; este valor puede variar, para deportistas en sillas de ruedas la potencia puede llegar hasta los 200 Watts [29]. La potencia considerada para el diseño de la cadena es la potencia máxima a la que se podría someter la transmisión, que es la de 200 Watts, ya que un deportista podría utilizar el dispositivo de propulsión.

Para la selección de la cadena se utilizó la potencia máxima posible, que es la producida por un deportista 200 Watts o 0.2 kWatts y una velocidad (ω) de 100 r.p.m., ya que las velocidades de giro producidas por el movimiento del usuario difícilmente sobrepasan este límite. Se realiza una primera estimación del posible paso, mediante el gráfico para la selección de cadenas Norma ISO 606 Serie Europea (Apéndice D), obteniendo un paso inicial de 9.525 mm. Es necesario hacer una corrección en la potencia transmitida para la selección de la cadena.

$$P_c = P * k_1 * k_2 * k_3 * k_4 * k_5 \quad (3.20)$$

Donde k_1 es el coeficiente relacionado con el número de dientes del piñón o rueda dentada de entrada, el cual es $N_1 = Z_1 = 45$ y utilizando la gráfica de la Figura 3.7 se obtiene un $k_1 = 0.4$.

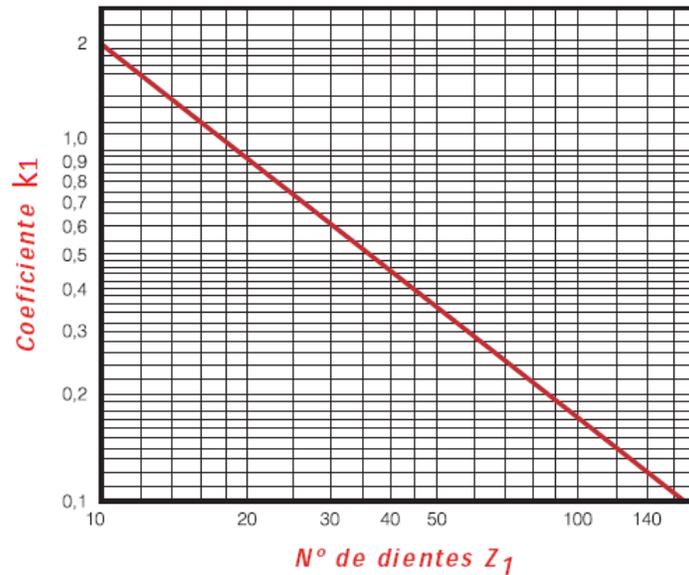


Figura 3.7: Gráfica para el cálculo del coeficiente k_1 [21].

El factor k_2 es el coeficiente de corrección por número de cadenas, en este caso se utiliza una cadena por lo cual $k_2 = 1$. k_3 es el coeficiente determinado por el número de enlaces en la cadena, al carecer de información para determinar este coeficiente se supone $k_3 = 1$ y posteriormente se determinará nuevamente. k_4 se relaciona con el factor de servicio y toma en cuenta las condiciones de trabajo de la transmisión, el factor de corrección considerando carga irregular y tipo de transmisión mecánica es $k_4 = 1.7$. k_5 es el factor relacionado con la vida útil de la cadena, considerando una vida útil para la cadena de 20000 horas se obtiene $k_5 = 1.4$. De este modo la potencia corregida es la siguiente:

$$P_c = 0.20\text{kWatts}(0.4)(1)(1)(1.7)(1.4) = 0.1904 \text{ kWatts} \quad (3.21)$$

Con estos parámetros y con la velocidad en r.p.m de los ejes, mediante la utilización de la tabla técnica (Apéndice C) se recomienda una cadena del tipo 06B que son cadenas con un paso (p) de 9.525 mm o 0.375 in.

Para determinar la relación de transmisión, se tomó en cuenta uno de los principales puntos mencionados por los usuarios y por los especialistas consultados, que es el poco impulso y la dificultad para subir pendientes. Para que los usuarios sean capaces de tener mayor impulso y subir pendientes fácilmente, el diámetro

de la rueda dentada de salida debe ser mayor al diámetro del piñón o rueda dentada de entrada. Se determinaron N_1 y N_2 , que son los números de dientes de las ruedas dentadas, que junto con el paso, determinan el diámetro. $N_1 = 45$ es el número de dientes de la rueda dentada de entrada, que forma parte del mecanismo de cuatro barras y se seleccionó con base en la longitud L_1 , ya que el diámetro debe ser mayor a esta longitud para poder contener el elemento barra y además poder funcionar como una rueda dentada. $N_2 = 64$ es el número de dientes de la rueda dentada de salida y el cual se seleccionó en base a la restricción establecida del diámetro (< 20 cm) para que no afectara demasiado en dos de los requerimientos más importantes de los usuarios, establecidos en el Capítulo 2, el tamaño (28%) y el peso (18%) del dispositivo.

Con esta información se calcularon los diámetros de paso para las dos ruedas dentadas D_{p1} , D_{p2} y la relación de transmisión (RT).

$$D_{p1} = \frac{9.525\text{mm}}{\text{sen}(\pi/45)} = 136.55 \text{ mm} \quad (3.22)$$

$$D_{p2} = \frac{9.525\text{mm}}{\text{sen}(\pi/64)} = 194.12 \text{ mm} \quad (3.23)$$

$$RT = \frac{N_1}{N_2} = \frac{45}{64} = 0.7 \quad (3.24)$$

La relación de transmisión obtenida es menor a uno, lo que significa que actúa como reductor, disminuyendo la velocidad del eje de salida. Sin embargo, esta configuración eleva el torque de salida proporcionando una ventaja mecánica de 1.42, que es la relación D_{p2}/D_{p1} .

Finalmente se calcula β , que es el ángulo de contacto de la cadena con las ruedas dentadas, necesario para calcular la longitud de la cadena.

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{97.06\text{mm} - 68.275\text{mm}}{208\text{mm}}\right) = 82^\circ = 1.432 \text{ radianes} \quad (3.25)$$

Donde $R_1 = 68.275$ y $R_2 = 97.06$, son los radios de las ruedas dentadas de entrada y salida, respectivamente; $D_c = 208$, es la distancia entre centros de las ruedas dentadas, que se obtiene restando L_0 a la distancia entre el eje de la llanta y el punto b_0 , que de acuerdo al modelo estándar de la silla de ruedas utilizado es de 0.43 m. Posteriormente es posible calcular la longitud de la cadena sustituyendo

los valores, cabe mencionar que el valor de β se utiliza en radianes para el cálculo de la longitud L .

$$L = \frac{(N_1 + N_2)}{2}p + (N_2 - N_1)\frac{\beta}{\pi}p + 2D_c \cos(\beta) = 1017.47 \text{ mm} \quad (3.26)$$

Con la longitud de la cadena obtenida, es posible determinar con mayor precisión el coeficiente k_3 que depende del número de enlaces en la cadena, que se obtiene dividiendo L entre el paso, obteniendo 107 eslabones. El nuevo coeficiente considerando el número de eslabones de la cadena es $k_3 = 1.1$, por lo tanto la potencia corregida es:

$$P_c = 0.20 \text{ kWatts} (0.4)(1)(1.1)(1.7)(1.4) = 0.2094 \text{ kWatts} \quad (3.27)$$

Con la potencia corregida la selección de la cadena no cambia, sigue siendo del tipo 06B con un paso de 9.525 mm.

3.3. Subsistema de frenos

Los frenos del dispositivo se seleccionaron de tipo cáliper, que son los más comunes en dispositivos como la bicicleta. Estos se componen de dos brazos y en cada uno de ellos una zapata. Los brazos giran en torno a un eje o tornillo que además sirve para fijarlos. Al girar los brazos, accionados por un chicote o cable conectado a una palanca, las zapatas presionan ambos costados de la llanta y por medio de fricción detienen su giro.

Este tipo de frenos son de bajo costo, son sencillos y disminuyen el peso así como el espacio utilizado en comparación con otros sistemas de frenos, como lo son los frenos de disco. Además tienen gran capacidad para frenar elementos como llantas que giran a bajas velocidades.

La Figura 3.8 muestra la palanca o maneta seleccionada, ésta tiene un peso aproximado de 100 gramos y se utiliza para accionar los frenos.

El cáliper de los frenos se seleccionó de tiro lateral con un solo pivote (Figura 3.9), debido a su tamaño y al método para fijarlos de un solo punto que sirve como pivote para los brazos.



Figura 3.8: Maneta seleccionada [22].



Item Specifications

Color	Black
Weight	204 g
Brake Type	BMX Sidepull
Brake Reach	68-91
Brake Lever Actuation	Short Pull

Figura 3.9: Cáliper seleccionado [23].

Los elementos de las Figuras 3.8 y 3.9 forman, junto con un cable de acero el sistema de frenado.

3.4. Modelado CAD y simulaciones

El dispositivo diseñado se modeló en *SolidWorks* con el fin de obtener una representación virtual, es decir, obtener un prototipo virtual en el que se pudieran verificar características como funcionalidad, dimensiones e interferencias entre elementos, etc. Posteriormente se realizó una simulación con las cargas a las que el dispositivo estaría sometido, como fuerzas, torques, flujos, etc. Además, se realizó un análisis de elemento finito, que es un método de análisis estructural

que toma en cuenta las fuerzas aplicadas y las propiedades de los elementos para determinar los esfuerzos a los que se encuentran sujetos los componentes [102].

3.4.1. Modelado CAD

Para el modelado del sistema de cuatro barras ya se tienen las longitudes para los elementos, sin embargo, es necesario determinar su forma general. Los elementos del mecanismo de cuatro barras se consideraron como placas con diferentes espesores, conectadas mediante pernos de media pulgada. Algunos de los elementos presentan ranuras, las cuales ayudan a disminuir el peso final del dispositivo. Las dimensiones exactas de cada componente se encuentran en los planos de dibujo (Apéndice E).

Para poder montar el sistema de cuatro barras conectado con el sistema de transmisión por cadena se optó por agregar una barra o placa principal (Figura 3.10), en donde se montan los ejes de las ruedas dentadas así como el pivote donde se conecta el extremo de la palanca.

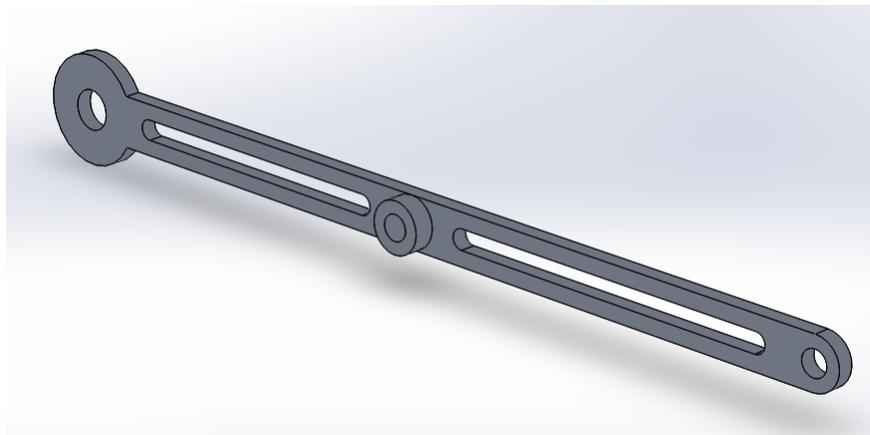


Figura 3.10: Barra principal.

El elemento tres del mecanismo de barras pertenece a la palanca (Figura 3.11), la cual se encuentra pivotada en un extremo de la barra principal y en el otro extremo se monta la empuñadura.

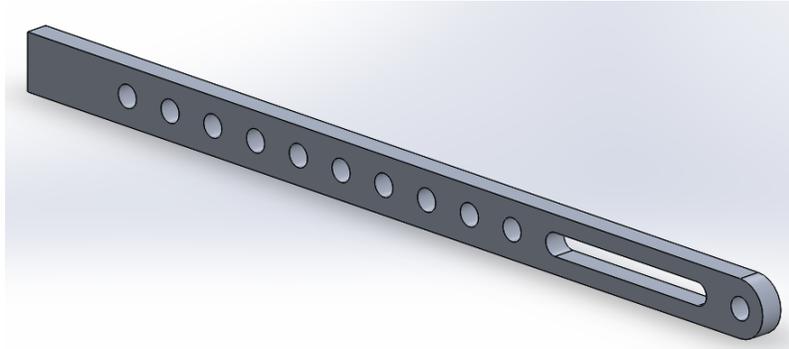


Figura 3.11: Palanca.

En la Figura 3.12 se muestra el elemento dos del mecanismo de barras, el cual conecta la palanca con la rueda dentada que funge como el elemento uno en el mecanismo.

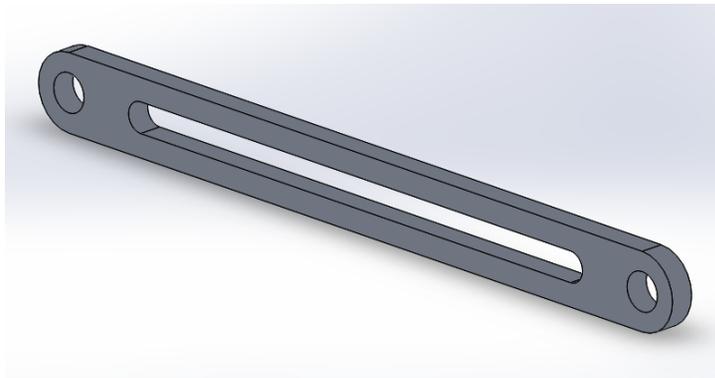


Figura 3.12: Barra conectora.

Posteriormente se modeló la rueda dentada de entrada o piñón de la transmisión por cadena (Figura 3.13), la cual se conecta a la barra de la palanca mediante la barra conectora para poder producir torque con la fuerza proporcionada por el usuario.

La rueda dentada de salida (Figura 3.14) es libre, es decir, permite transmitir el momento o torque en un solo sentido y en el otro gira libremente sin transmitir torque. Esto permite al usuario detener la palanca en cualquier momento sin que sea afectado por la inercia del movimiento de las ruedas.

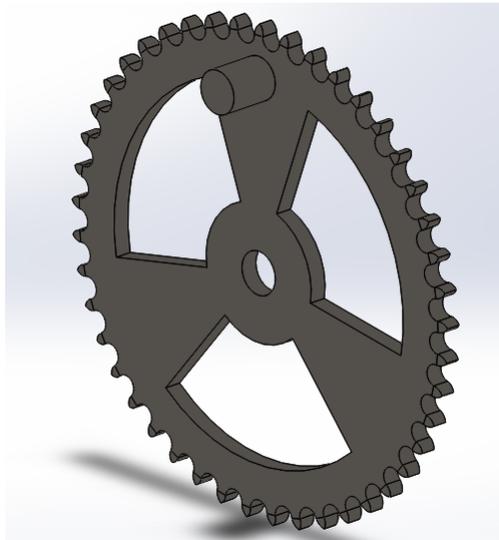


Figura 3.13: Rueda dentada de entrada (Piñón).

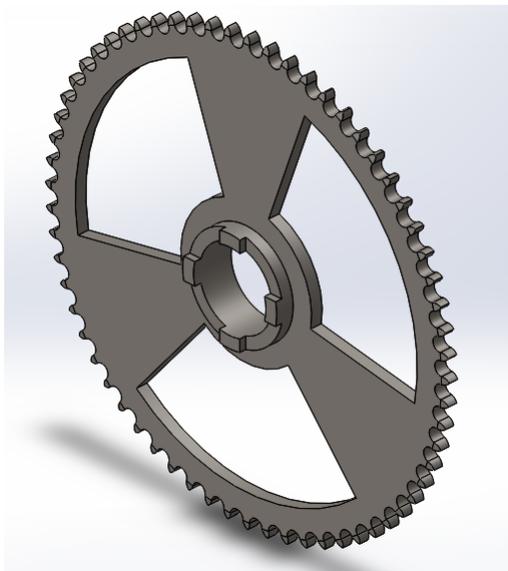


Figura 3.14: Rueda dentada de salida.

Las ruedas dentadas de salida se conectan con las ruedas de la silla para transmitir el torque generado por el dispositivo. Esto se logra mediante un elemento de acoplamiento (Figura 3.15), que ensambla con la rueda dentada libre y la llanta como se muestra en la Figura (3.16)

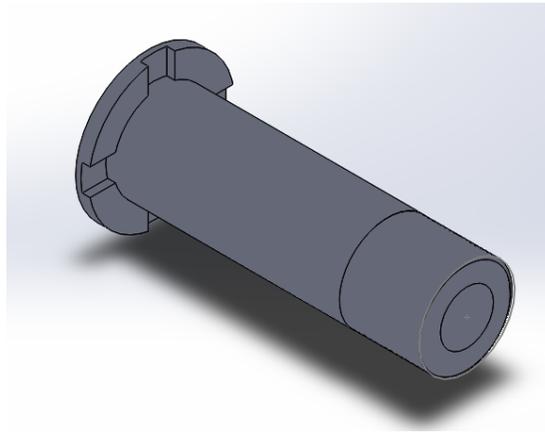


Figura 3.15: Elemento de acoplamiento.

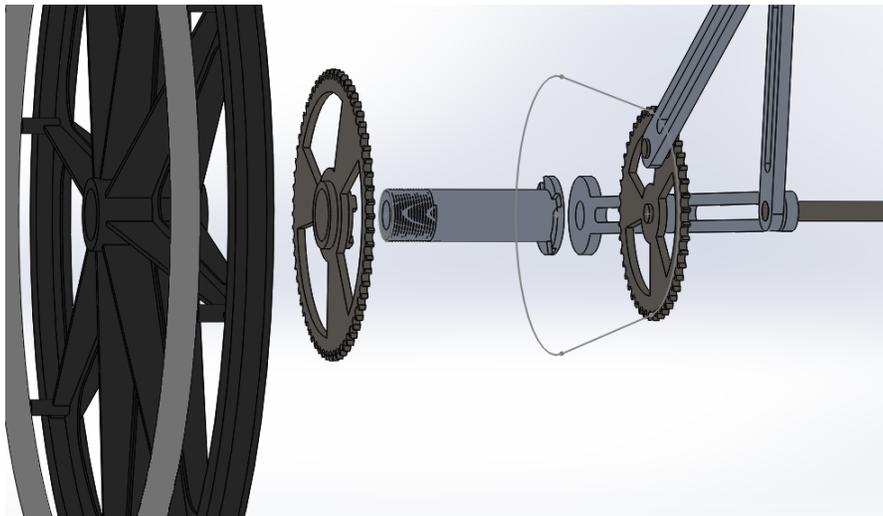


Figura 3.16: Acoplamiento del dispositivo con la llanta.

Las manetas del sistema de frenos, se montan en la palanca de forma vertical. Por otro lado, fue necesario diseñar un soporte con el fin de fijar los cáliper. En la Figura 3.17 se presenta el soporte propuesto, éste se monta en pares a cada lado de la silla y se fijan a la estructura mediante pernos o tornillos, como se muestra en la Figura 3.18.

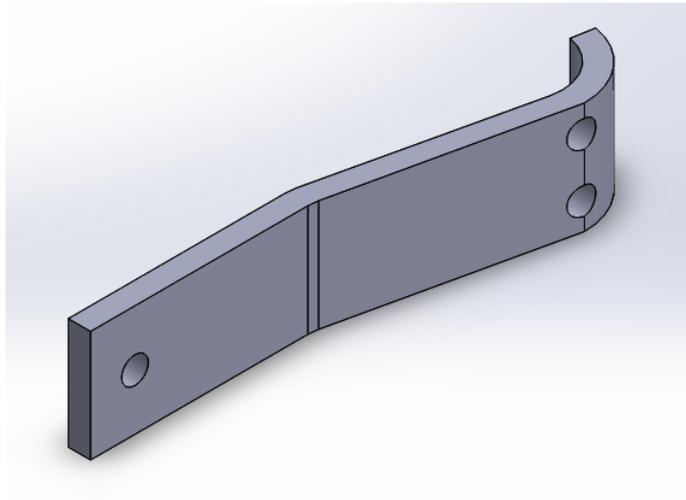


Figura 3.17: Soporte de calipers.

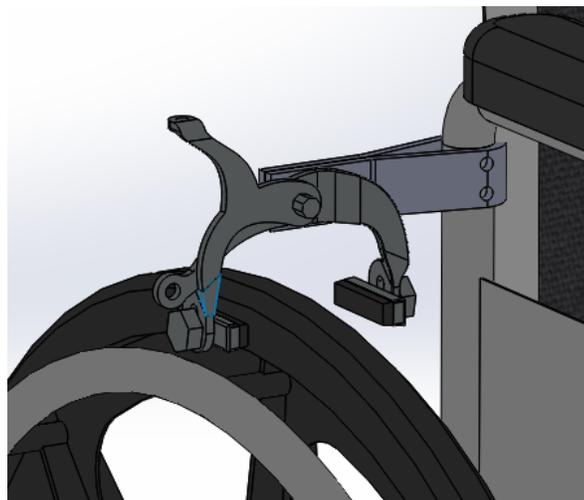


Figura 3.18: Montaje de los soportes para caliper.

La Figura 3.19 muestra el dispositivo de propulsión ensamblado. Éste se ensambla con el extremo de mayor diámetro de la barra principal sobre el eje de las ruedas principales. El otro extremo se fija a la estructura de la silla de ruedas mediante un perno, con la barra principal en una posición horizontal, el cual sirve como pivote para la palanca.

Para propulsarse adecuadamente, es necesario montar un dispositivo en cada lado de la silla. En la Figura 3.20 se muestran dos dispositivos, uno en cada lado, montados en una silla de ruedas estándar.

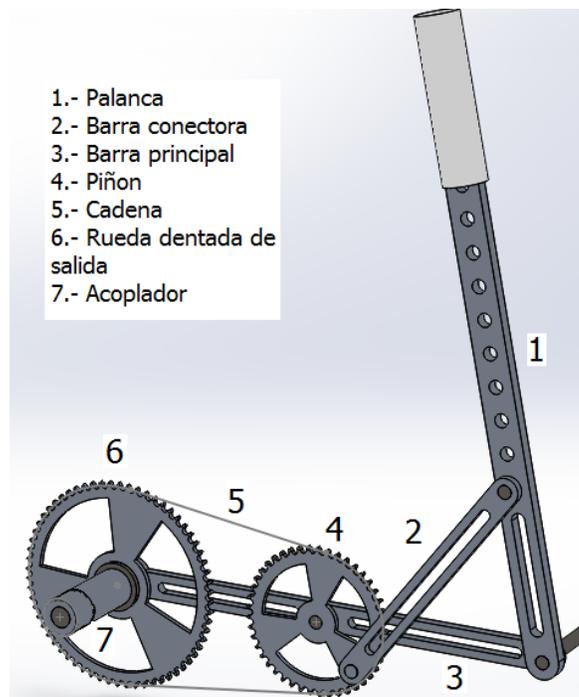


Figura 3.19: Dispositivo de propulsión ensamblado.



Figura 3.20: Silla de ruedas con el dispositivo de propulsión diseñado montado en cada lado.

3.4.2. Simulaciones

Para las simulaciones es necesario definir las fuerzas o cargas aplicadas y las propiedades de los elementos o componentes. La fuerza utilizada para la simulación fue de 208.2 Newtons, simulando la fuerza proporcionada por el usuario y se aplicó en el extremo de la palanca, donde se coloca la empuñadura, en una dirección perpendicular. Por otro lado, las propiedades de los elementos se definen por el material de cada uno de ellos.

Los materiales más utilizados en el diseño de máquinas son: aceros, con muy buenas características mecánicas y las fundiciones, fáciles de moldear; tanto los aceros como las fundiciones tienen un coste moderado; sin embargo, son densos y vulnerables a la corrosión; aceros inoxidable, son resistentes a la corrosión pero tienen un coste elevado; aleaciones de aluminio, son ligeras y resistentes a la corrosión pero de costo elevado; aleaciones de cobre, excelente conductividad eléctrica y térmica, resistentes a la corrosión y con características mecánicas medias; sin embargo, son muy densas y costosas [103].

El dispositivo de propulsión debe contar con una buena relación resistencia/peso con el fin de disminuir el peso agregado a la silla de ruedas. De los materiales mencionados anteriormente, los que cumplen con esta característica son las aleaciones de aluminio. Por lo tanto, se seleccionó una aleación de aluminio 6061-t4, cuyos principales elementos son el magnesio y el silicio. Esta aleación cuenta con una de las mejores relaciones resistencia/peso, es resistente a la corrosión y es una de las de menor costo dentro de las aleaciones de aluminio. La mayoría de los componentes del dispositivo son de aluminio a excepción de la parte interna del *sprocket* libre y los pernos, donde se utiliza acero 1035, utilizado en los componentes comerciales de este tipo.

Para la simulación, se consideró que un análisis estático en posiciones clave del mecanismo era suficiente para determinar los esfuerzos máximos a los que pudieran estar sujetos los elementos del dispositivo y que se presentan antes de iniciar el movimiento o cuando la silla está en reposo. Una vez iniciado el movimiento la carga sobre los elementos disminuirá.

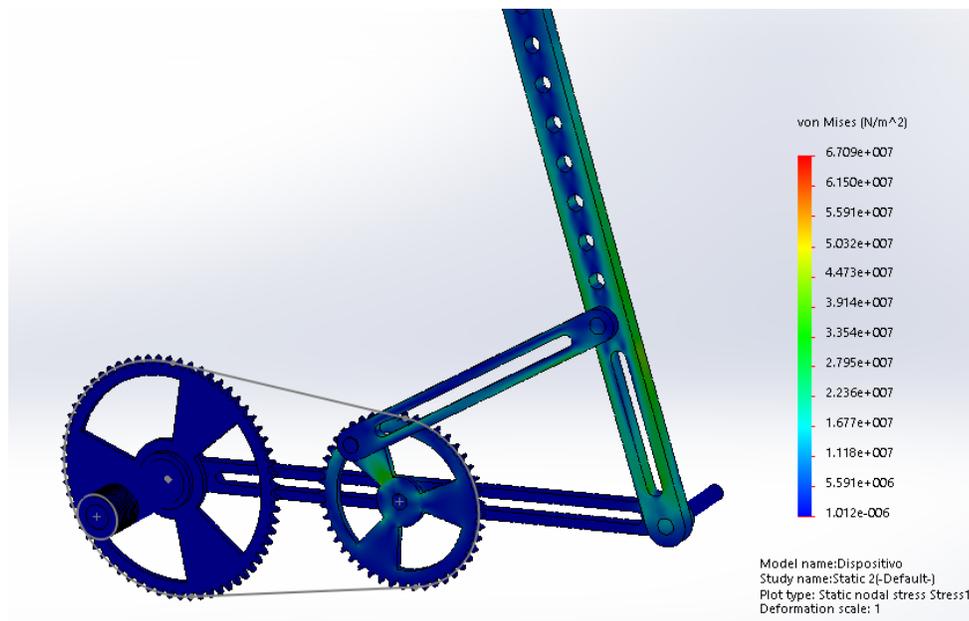


Figura 3.22: Análisis en posición dos, cuando el piñon gira 60° después de la posición inicial.

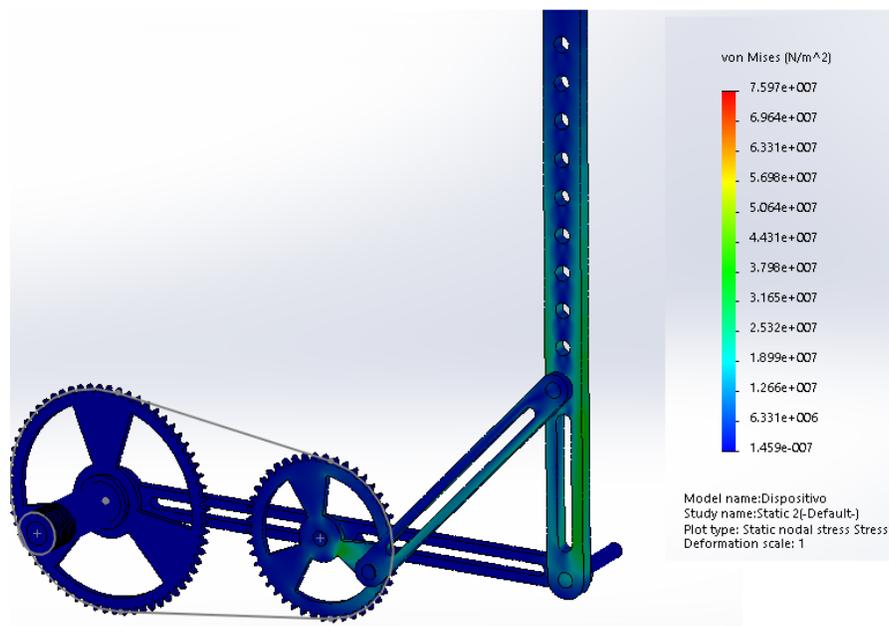


Figura 3.23: Análisis en posición tres, cuando el piñon gira 280° después de la posición inicial.

Como se observa en las Figuras 3.21, 3.22 y 3.23, el elemento que presenta el esfuerzo máximo en el mecanismo es el componente de la palanca con un valor de $7.680 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, concentrándose en las ranuras hechas para disminuir el peso del dispositivo. Tomando en cuenta que el límite elástico de la aleación de aluminio 6061-T4 es de $227526990.7 \text{ N/m}^2$, es posible obtener el factor de seguridad (FS), que indica la capacidad de exceso del sistema para soportar cargas.

$$FS = \frac{\text{Límite elástico}}{\text{Esfuerzo máximo}} = \frac{227526990.7 \text{ N/m}^2}{76800000 \text{ N/m}^2} = 2.9 \quad (3.28)$$

Para el cálculo del esfuerzo en la cadena (F) y el coeficiente de seguridad (C_s), es necesario calcular la velocidad lineal de la cadena (V) con la ecuación (3.29) [101].

$$V = \frac{p\omega N_1}{60} = \frac{(0.009525 \text{ m})(45)(100 \text{ r.p.m.})}{60} = 0.7143 \text{ m/s} \quad (3.29)$$

Posteriormente, el esfuerzo desarrollado por la cadena se calcula con la siguiente expresión:

$$F = \frac{\text{Potencia transmitida}}{V} = \frac{200 \text{ Watts}}{0.7143 \text{ m/s}} = 280 \text{ Newtons} \quad (3.30)$$

Para determinar el coeficiente de seguridad (C_s) de la cadena es necesario considerar la carga a la rotura (R), proporcionada por los fabricantes como característica técnica [104]. Para este caso se considero una $R = 8900 \text{ Newtons}$ [20].

$$C_s = \frac{R}{F} = \frac{8900 \text{ N}}{260 \text{ N}} = 34.23 \quad (3.31)$$

Conclusiones

El objetivo de este proyecto es el de proponer una alternativa de propulsión para los usuarios de sillas de ruedas manuales, basado en información obtenida de usuarios y especialistas del tema, el cual disminuya las exigencias físicas producidas durante la propulsión mediante el MPC, por lo que se propuso un dispositivo mecánico presentado y diseñado en este trabajo.

Uno de los puntos a favor en el diseño realizado, es que se incluye la opinión de los usuarios de sillas de ruedas manuales, teniendo una mejor perspectiva sobre lo que quieren los usuarios finales o clientes. En base a la metodología y a las herramientas utilizadas, tanto del DCU como de TRIZ fue posible establecer un criterio de selección para el diseño final, el cual obtuvo la mejor evaluación de acuerdo con los requerimientos de los usuarios, resultando el sistema desarrollado en el presente trabajo.

De las características más importantes resaltadas por los usuarios, se identifican la reducción de la fuerza necesaria para impulsarse y la facilidad para subir rampas o pendientes, lo que se traduce en ventaja mecánica, la cual está presente en el dispositivo y se produce en dos etapas, la primera etapa es la ventaja mecánica que proporciona la palanca y la segunda etapa la proporcionada por la transmisión por cadena.

Con el análisis de fuerzas realizado se observó que el mecanismo de barras utilizado es capaz de generar hasta 30 Nm, que es más del doble del torque necesario para subir una rampa [100], esto significa que el usuario debe aplicar menor fuerza para poder propulsarse como normalmente lo haría con el MPC, lo que era de esperarse debido a la ventaja mecánica proporcionada. El usuario quizás no se traslade rápidamente, sin embargo, le será más fácil subir pendientes y podrá impulsarse utilizando una menor cantidad de fuerza.

Otro de los puntos a favor del dispositivo, es que utiliza el movimiento de remo para mover las palancas, este movimiento reduce las malas posiciones que se tienen durante la propulsión con el MPC e involucra un mayor número de músculos, lo que reduce la carga física en los brazos [10, 98].

Las geometrías de los componentes del dispositivo diseñado son sencillas, lo que implica una fácil manufactura, es decir, sin la necesidad de herramientas especializadas o de habilidades específicas. Así mismo, el material seleccionado es de las aleaciones de aluminio con mayor circulación comercial.

Las simulaciones realizadas con el modelo virtual, indicaron que el elemento más propenso a fallar es la palanca; sin embargo, el factor de seguridad obtenido fue de 2.9, lo que significa que el dispositivo es capaz de resistir aproximadamente tres veces más la fuerza que se aplicó en la simulación.

Por otro lado, el coeficiente de seguridad para la transmisión por cadena fue de 34.23, que no es de sorprender, debido a la baja potencia y bajas velocidades de giro de los ejes, por lo que la cadena está sobrada en capacidad.

Utilizando el modelo virtual y las propiedades de los materiales seleccionados, se realizó una estimación de la masa del dispositivo (ver Figura 3.24).

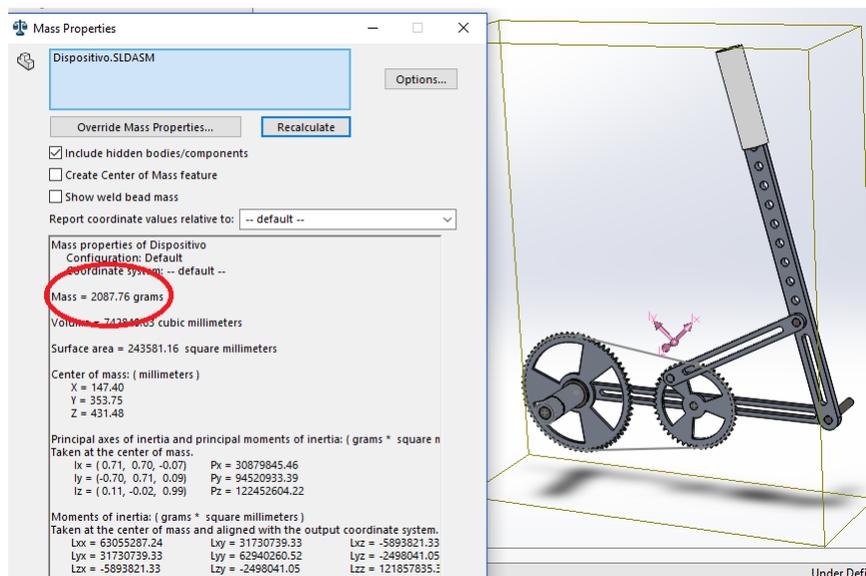


Figura 3.24: Estimación del peso del dispositivo diseñado.

La masa estimada para el dispositivo diseñado es de 2.09 kg, sumando 0.1 kg de la maneta de los frenos, 0.2 kg del cáliper, 0.1 kg de los soportes para frenos

y finalmente 0.39 kg de la cadena, que tiene una masa unitaria de 0.39 kg/m, se obtiene como resultado 2.88 kg. Tomando en cuenta que se necesitan dos dispositivos para una silla de ruedas, la masa total agregada a la silla es de 5.86 kg.

En la Tabla 3.1 se comparan algunas características de otros dispositivos de propulsión por palancas con las del dispositivo diseñado.

Tabla 3.1: Comparación del dispositivo diseñado con otros sistemas de propulsión por palancas.

Características	Silla estándar	Willgo	Wijit	Dispositivo diseñado
Masa (kg)	12.9	17.8	18.7	18.66
Longitud de la palanca (m)		30	50	50
Ángulo de movimiento (°)		100	75	40
Mecanismo		Resorte de torsión	Embrague giratorio	Barras/cadena
Relación de transmisión		1:1	1:2	1:0.7
Fase de recuperación	Si	si	si	no

Como se puede observar, la masa del dispositivo diseñado es similar a la del sistema *wijit*, sin embargo, la amplitud del movimiento es menor comparado con los otros dos dispositivos, teniendo que realizar un menor movimiento para propulsarse. La relación de transmisión es menor comparado con las relaciones de los otros dispositivos, lo que significa que se enfocan más en aumentar la velocidad de giro del eje de las llantas, mientras que el dispositivo diseñado se enfocó en la ventaja mecánica, reduciendo la fuerza necesaria para impulsarse y facilitando subir pendientes.

Cabe resaltar que los otros dos dispositivos de propulsión por palancas siguen teniendo una fase de recuperación, mientras que el diseño propuesto elimina esta fase de recuperación proporcionando una propulsión continua. Sin embargo es capaz de propulsar la silla de ruedas en una sola dirección, hacia enfrente, que es la dirección en la que el usuario se impulsa la mayor parte del tiempo. Si el usuario necesita moverse hacia atrás se vera en la necesidad de girar o en su defecto, utilizar el MPC.

Como trabajo futuro se sugiere la construcción de un prototipo físico con el fin de realizar pruebas de campo que sirvan como retroalimentación para mejorar el diseño. También se sugiere hacer un estudio a fondo para determinar las posibles ventajas y desventajas, así como las consecuencias producidas por el uso prolongado del dispositivo diseñado.

Bibliografía

- [1] S. Bonnita. (2002) Wheeling in the new millennium: The history of the wheelchair and the driving forces of the wheelchair design of today. [Online]. Available: http://www.wheelchairnet.org/WCN_WCU/SlideLectures/Sawatzky/WC_history.html
- [2] G. G. Grindle, "Introduction to powered mobility," 2010.
- [3] V. Abuelo. (2013) Uso correcto de la silla de ruedas manual, parte 1. [Online]. Available: <http://vidaabuelo.com/blog/uso-correcto-de-la-silla-de-ruedas-manual-parte-1/>
- [4] Invacare. (2015) Alber e-motion m15. [Online]. Available: <http://www.invacare.es/es/alber-e-motion-m15-80m15es>
- [5] J. Bejesed. (2013) Aparatos medicos disponibles. [Online]. Available: <http://jaimbejesed.com/#prettyPhoto>
- [6] cuiddo. (2015) Scooter eléctrico sterling diamond. [Online]. Available: <http://www.cuiddo.es/scooter-electrico-diamond-sunrise-medical.html>
- [7] CHAIRDEX. (2007) Tipos de sillas de ruedas. [Online]. Available: <http://www.chairdex.com/stypes.htm>
- [8] K. Betz, "Ergonomics of manual wheelchair propulsion," 2010.
- [9] J. Yang, M. L. Boninger, J. D. Leath, S. G. Fitzgerald, T. A. Dyson-Hudson, and M. W. Chang, "Carpal tunnel syndrome in manual wheelchair users with spinal cord injury: a cross-sectional multicenter study," *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, vol. 88, no. 12, pp. 1007–1016, 2009.

- [10] L. H. van der Woude, A. J. Dallmeijer, T. W. Janssen, and D. Veeger, "Alternative modes of manual wheelchair ambulation: an overview," *American journal of physical medicine & rehabilitation*, vol. 80, no. 10, pp. 765–777, 2001.
- [11] T. Harrington and G. Murphy, "Lever propulsion design for manual wheelchairs," in *Bioengineering Conference, 2004. Proceedings of the IEEE 30th Annual Northeast*. IEEE, 2004, pp. 210–211.
- [12] E. RAND and R. Koffsky, "Ergonomic wheelchair propulsion system," Feb. 7 2012, uS Patent 8,109,529.
- [13] B. Watwood, D. Dejong, and E. Armstrong, "Wheelchair drive mechanism," Oct. 30 2013, eP Patent 1,567,409.
- [14] E. Gilbertson. (1999) Lever-powered wheelchair. [Online]. Available: <http://web.mit.edu/egilbert/www/ewg/wheelchair.html>
- [15] J. Engineering. (2015) Quantum runner. [Online]. Available: <http://myplace.frontier.com/~j.schaeff/index.htm>
- [16] R. Young, "Propulsion and safety device for a conventional wheelchair," Sep. 18 1984, uS Patent 4,471,972.
- [17] A. G. S. Erdman, G. N. Cera *et al.*, *Diseño de mecanismos: análisis y síntesis*, 1998.
- [18] F. D. I. M.-U. T. D. PEREIRA. (2012) Capítulo 3. mecanismo de cuatro eslabones. [Online]. Available: <http://blog.utp.edu.co/adriamec/files/2012/09/CAP%C3%8DTULO-3-MECANISMO-DE-CUATRO-ESLABONES.pdf>
- [19] Martin. (2013) Sprockets para cadena de rodillos. sprockets métricos estándares iso.
- [20] T. cadenas. (2015) Catalogo 1-2. cadena de transmision. [Online]. Available: http://tsubaki.de/assets/CAT%20combi%201-2_ES%202015.PDF
- [21] JORESA. (2016) Cálculo de una transmisión por cadena. [Online]. Available: http://www.joresa.com/1/upload/cadena_transmision_calculo.pdf

- [22] Shimano. (2016) Componentes de bicicleta. Fecha de acceso: 6 de Noviembre del 2016. [Online]. Available: http://www.habicicletas.com/images/stories/habicicletas/catalogos/2_CATALOGO_SHIMANO_2016_web.pdf
- [23] ebay. (2016) Tektro 984 pinza freno bmx bitless frontal freestyle negro. [Online]. Available: <http://www.ebay.com/itm/Tektro-984-BMX-Sidepull-Front-Freestyle-Caliper-Brake-Black-/192027923371?hash=item2cb5c193ab:g:Et8AAOSwcLxYKv5F>
- [24] G. e. I. Instituto Nacional de Estadística, “Estadísticas a propósito del día internacional de las personas de edad,” 2005.
- [25] M. M. C. F. Hernández Santos Carlos, “Diseño de un sistema emulando el movimiento articulado de una mano, brazo y antebrazo,” Master’s thesis, CENIDET, Departamento de Ingeniería mecatrónica, 2007.
- [26] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Yokoyama, K. Akachi, T. Kawasaki, S. Ota, and T. Isozumi, “Design of prototype humanoid robotics platform for hrp,” in *Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 3. IEEE, 2002, pp. 2431–2436.
- [27] T. de Monterrey. (2014) Tabla de contradicciones técnicas de altshuller. [Online]. Available: www.ametriz.com
- [28] B. M. OMS. (2011) Informe mundial sobre la discapacidad. [Online]. Available: http://www.who.int/disabilities/world_report/2011/es/index.html
- [29] J. L. Mercer, M. Boninger, A. Koontz, D. Ren, T. Dyson-Hudson, and R. Cooper, “Shoulder joint kinetics and pathology in manual wheelchair users,” *Clinical Biomechanics*, vol. 21, no. 8, pp. 781–789, 2006.
- [30] M. Boninger and R. Cooper, “Repetitive strain injuries in manual wheelchair users,” *Biomedical Aspects of Manual Wheelchair Propulsion: The State of the Art II*, vol. 5, pp. 115–120, 1999.
- [31] wheelchairbeyondlimits. (2013) Historia de las silla de ruedas. [Online]. Available: <https://wheelchairbeyondlimits.wordpress.com/2013/04/03/historia-de-las-sillas-de-ruedas/>

- [32] CHAIRDEX. (2007) History. [Online]. Available: <http://www.chairdex.com/history.htm>
- [33] O. M. de la Salud, "Pautas para el suministro de sillas de ruedas manuales en entornos de menores recursos," 2008.
- [34] L. Van der Woude, S. De Groot, and T. Janssen, "Manual wheelchairs: research and innovation in sports and daily life," *Science & sports*, vol. 21, no. 4, pp. 226–235, 2006.
- [35] N. Smith. (2013) Cuadraplejía y paraplejía. [Online]. Available: <https://www.cancercarewny.com/content.aspx?chunkiid=127567>
- [36] M. L. Boninger, M. Baldwin, R. A. Cooper, A. Koontz, and L. Chan, "Manual wheelchair pushrim biomechanics and axle position," *Archives of physical medicine and rehabilitation*, vol. 81, no. 5, pp. 608–613, 2000.
- [37] K. Vrongistinos, "Dynamic analysis and biomechanical modeling of wheelchair propulsion," Ph.D. dissertation, Auburn University, 2001.
- [38] P. Gorce and N. Louis, "Wheelchair propulsion kinematics in beginners and expert users: Influence of wheelchair settings," *Clinical Biomechanics*, vol. 27, no. 1, pp. 7–15, 2012.
- [39] M. L. Boninger, A. L. Souza, R. A. Cooper, S. G. Fitzgerald, A. M. Koontz, and B. T. Fay, "Propulsion patterns and pushrim biomechanics in manual wheelchair propulsion," *Archives of physical medicine and rehabilitation*, vol. 83, no. 5, pp. 718–723, 2002.
- [40] J. S. Slowik and R. R. Neptune, "A theoretical analysis of the influence of wheelchair seat position on upper extremity demand," *Clinical Biomechanics*, vol. 28, no. 4, pp. 378–385, 2013.
- [41] S. De Groot, H. Veeger, A. Hollander, and L. Van Der Woude, "Consequence of feedback-based learning of an effective hand rim wheelchair force production on mechanical efficiency," *Clinical Biomechanics*, vol. 17, no. 3, pp. 219–226, 2002.
- [42] S. De Groot, M. De Bruin, S. Noomen, and L. Van der Woude, "Mechanical efficiency and propulsion technique after 7 weeks of low-intensity wheelchair training," *Clinical biomechanics*, vol. 23, no. 4, pp. 434–441, 2008.

- [43] B. P. Bernard, V. Putz-Anderson *et al.*, *Musculoskeletal disorders and workplace factors: a critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back*. US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health Cincinnati, OH, USA, 1997, no. 97-141.
- [44] K. T. Asato, R. A. Cooper, R. N. Robertson, and J. Ster, "Smart/sup wheels: development and testing of a system for measuring manual wheelchair propulsion dynamics," *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 40, no. 12, pp. 1320–1324, 1993.
- [45] C.-J. Lin, P.-C. Lin, L.-Y. Guo, and F.-C. Su, "Prediction of applied forces in handrim wheelchair propulsion," *Journal of biomechanics*, vol. 44, no. 3, pp. 455–460, 2011.
- [46] M. Leary, J. Gruijters, M. Mazur, A. Subic, M. Burton, and F. Fuss, "A fundamental model of quasi-static wheelchair biomechanics," *Medical engineering & physics*, vol. 34, no. 9, pp. 1278–1286, 2012.
- [47] D. A. Ballinger, D. H. Rintala, and K. A. Hart, "The relation of shoulder pain and range-of-motion problems to functional limitations, disability, and perceived health of men with spinal cord injury: a multifaceted longitudinal study," *Archives of physical medicine and rehabilitation*, vol. 81, no. 12, pp. 1575–1581, 2000.
- [48] J. Subbarao, J. Klopstein, and R. Turpin, "Prevalence and impact of wrist and shoulder pain in patients with spinal cord injury," *The journal of spinal cord medicine*, vol. 18, no. 1, pp. 9–13, 1995.
- [49] N. I. of Neurological Disorders and Stroke. (2012) Síndrome del túnel carpiano. [Online]. Available: http://espanol.ninds.nih.gov/trastornos/tunel_carpiano.htm
- [50] B. G. Impink, J. L. Collinger, and M. L. Boninger, "The effect of symptoms of carpal tunnel syndrome on ultrasonographic median nerve measures before and after wheelchair propulsion," *PM&R*, vol. 3, no. 9, pp. 803–810, 2011.

- [51] R. Moraes, J. Ribeiro, W. Frontera, D. Dawson, and D. Slovik, "Exercise in rehabilitation medicine," *Heart disease. Champaign, IL. Human Kinetics*, 1999.
- [52] R. J. SHEPHARD and Y. BHAMBHANI, "Recommendations for the fitness assessment, programming, and counselling of persons with a disability," *Canadian journal of applied physiology*, vol. 23, no. 2, pp. 119–130, 1998.
- [53] S. J. Van Coppenolle H, Vanlandewijck Y, "A white paper on research and practice," *First European Conference on Adapted Physical Activity and Sports*, 1995.
- [54] R. A. Cooper, *Rehabilitation engineering applied to mobility and manipulation*. CRC Press, 1995.
- [55] L. H. V. van der Woude, *Ergonomics of manual wheelchair propulsion: state of the art; COMAC BME, Concerted Action Mobility Restoration for Paralysed Persons; [this book is based on the proceedings of the workshop held in Amsterdam, October 17-19, 1991]*. Ed. Pro Juventute, 1993.
- [56] C. H. Kemenade, *Biomedical aspects of manual wheelchair propulsion: the state of the art II*. IOS press, 1999, vol. 5.
- [57] R. ROZENDAL, M. ROEBROECK, and L. VAN DER WOUDE, "Methodology of user evaluation of hand driven wheelchairs." *International Journal of Rehabilitation Research*, vol. 13, no. 3, pp. 265–268, 1990.
- [58] K. Curtis, T. Tyner, L. Zachary, G. Lentell, D. Brink, T. Didyk, K. Gean, J. Hall, M. Hooper, J. Klos *et al.*, "Effect of a standard exercise protocol on shoulder pain in long-term wheelchair users." *Spinal cord*, vol. 37, no. 6, 1999.
- [59] E. Voigt and D. Bahn, "Metabolism and pulse rate in physically handicapped when propelling a wheel chair up and incline." *Scandinavian journal of rehabilitation medicine*, vol. 1, no. 3, p. 101, 1969.
- [60] G. Hildebrandt, E. Voight, D. Bahn, B. Berendes, and J. Kröger, "Energy costs of propelling wheelchair at various speeds: cardiac response and effect on steering accuracy." *Archives of physical medicine and rehabilitation*, vol. 51, no. 3, pp. 131–136, 1970.

- [61] T. Janssen, C. Van Oers, L. Van der Woude, and A. P. Hollander, "Physical strain in daily life of wheelchair users with spinal cord injuries." *Medicine and science in sports and exercise*, vol. 26, no. 6, pp. 661–670, 1994.
- [62] N. Hjeltnes and Z. Vokac, "Circulatory strain in everyday life of paraplegics." *Scandinavian journal of rehabilitation medicine*, vol. 11, no. 2, pp. 67–73, 1978.
- [63] H. S. Nan, "Detachable propulsive device for wheelchair," Oct. 27 1998, uS Patent 5,826,670.
- [64] J. Gangelhoff, L. Cordain, A. Tucker, and J. Sockler, "Metabolic and heart rate responses to submaximal arm lever and arm crank ergometry." *Archives of physical medicine and rehabilitation*, vol. 69, no. 2, pp. 101–105, 1988.
- [65] P. Smith, R. Glaser, J. Petrofsky, P. Underwood, G. Smith, and J. Richard, "Arm crank vs handrim wheelchair propulsion: metabolic and cardiopulmonary responses." *Archives of physical medicine and rehabilitation*, vol. 64, no. 6, pp. 249–254, 1983.
- [66] P. Engel and G. Hildebrandt, "Wheelchair design—technological and physiological aspects." *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, vol. 67, no. 5, p. 409, 1974.
- [67] G. Martel, L. Noreau, and J. Jobin, "Physiological responses to maximal exercise on arm cranking and wheelchair ergometer with paraplegics," *Spinal Cord*, vol. 29, no. 7, pp. 447–456, 1991.
- [68] S. Segner and J. Bergstrand, "A comparison of three-wheeled human powered bicycles for persons with physical disabilities," in *Proceedings of RESNA 10th Annual Conference, San Jose*, 1987, pp. 550–2.
- [69] N. Crase, R. Schmid, and S. Robbins, "Pedal power: hand-cycle survey," *Sports & Spokes*, vol. 12, pp. 27–30, 1987.
- [70] L. Van der Woude, E. van Krmen, G. Ariens, R. Rozendal, and H. Veeger, "Physical strain and mechanical efficiency in hubcrank and handrim wheelchair propulsion," *Journal of medical engineering & technology*, vol. 19, no. 4, pp. 123–131, 1995.

- [71] L. Van der Woude, K. Maas, R. Rozendal, and D. Veeger, "Physiological responses during hubcrank and handrim wheelchair propulsion: a pilot study," *Journal of Rehabilitation Sciences*, vol. 8, pp. 13–13, 1995.
- [72] F. Van der Vlies, C. Gerritsma, H. Veeger *et al.*, "Physiological responses in hubcrank and hand rim wheelchair propulsion using a computer controlled wheelchair ergometer, in van der woude lhv, et al.(eds): Biomedical aspects of manual wheelchair propulsion: State of the art ii," 1999.
- [73] H. M. Wedemeyer, "Detachable manual propulsion system," Feb. 19 1991, uS Patent 4,993,732.
- [74] W. G. Taylor, "Wheelchair," Feb. 2 1999, uS Patent 5,865,455.
- [75] D. S. Blosswick, J. R. Clark, M. Gallegos, B. J. Horne, A. M. Kearl, and R. Osawa, "Wheelchair advantage mobility system," Jan. 3 2012, uS Patent 8,087,684.
- [76] B. Kylstra, N. I. Jauvtis, T. M. Cook, J. W. Huff, and S. Kerrel, "Wheelchair drive system with lever propulsion and a hub-contained transmission," Nov. 23 2010, uS Patent 7,837,210.
- [77] H. Veeger, "Biomechanics of manual wheelchair propulsion," *Biomedical Aspects of Manual Wheelchair Propulsion: The State of the Art II*. IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, pp. 86–95, 1999.
- [78] H. Veeger, L. Van Der Woude, and R. Rozendal, "Effect of handrim velocity on mechanical efficiency in wheelchair propulsion." *Medicine and science in sports and exercise*, vol. 24, no. 1, pp. 100–107, 1992.
- [79] L. Van der Woude, H. Veeger, Y. d. Boer, and R. Rozendal, "Physiological evaluation of a newly designed lever mechanism for wheelchairs," *Journal of medical engineering & technology*, vol. 17, no. 6, pp. 232–240, 1993.
- [80] J. R. Wicks, N. B. Oldridge, B. J. Cameron, and N. L. Jones, "Arm cranking and wheelchair ergometry in elite spinal cord-injured athletes." *Medicine and science in sports and exercise*, vol. 15, no. 3, p. 224, 1983.
- [81] J. Wicks, K. Lymburner, S. Dinsdale, and N. Jones, "The use of multistage exercise testing with wheelchair ergometry and arm cranking in subjects with spinal cord lesions," *Spinal Cord*, vol. 15, no. 3, pp. 252–260, 1977.

- [82] M. N. Sawka, R. M. Glaser, S. W. Wilde, and T. C. von Lührte, "Metabolic and circulatory responses to wheelchair and arm crank exercise," *Journal of Applied Physiology*, vol. 49, no. 5, pp. 784–788, 1980.
- [83] S. E. DiCarlo, "Effect of arm ergometry training on wheelchair propulsion endurance of individuals with quadriplegia," *Physical therapy*, vol. 68, no. 1, pp. 40–44, 1988.
- [84] K. Pitetti, P. Snell, and J. Stray-Gundersen, "Maximal response of wheelchair-confined subjects to four types of arm exercise." *Archives of physical medicine and rehabilitation*, vol. 68, no. 1, pp. 10–13, 1987.
- [85] T. McConnell, M. Horvat, T. Beutel-Horvat, and L. Golding, "Arm crank versus wheelchair treadmill ergometry to evaluate the performance of paraplegics," *Spinal Cord*, vol. 27, no. 4, pp. 307–313, 1989.
- [86] D. Sedlock, R. Knowlton, and P. Fitzgerald, "Circulatory and metabolic responses of women to arm crank and wheelchair ergometry." *Archives of physical medicine and rehabilitation*, vol. 71, no. 2, pp. 97–100, 1990.
- [87] H. Tropp, K. Samuelsson, and L. Jorfeldt, "Power output for wheelchair driving on a treadmill compared with arm crank ergometry." *British journal of sports medicine*, vol. 31, no. 1, pp. 41–44, 1997.
- [88] D. Bailey and K. Hoepnner, "Handcycle and drive mechanism therefore," Sep. 20 2012, uS Patent App. 13/108,486.
- [89] N. Jauvtis, T. Cook, and S. Kerrel, "Mounting assembly for attaching auxiliary equipment to a wheelchair," Feb. 18 2014, uS Patent 8,651,507.
- [90] T. A. Robert Harris, "Técnicas de creatividad, brainstorming," 2016. [Online]. Available: http://www.innovaforum.com/tecnica/brain_e.htm
- [91] E. D. B. De Bono, E. d. B. De Bono, H. G. H. G. Furth, A. E. Bianchi, R. L. Ackoff, R. L. Ackoff, J. O'connor, J. O'Connor, S. Watt, A. Deutschman *et al.*, *El pensamiento lateral: manual de creatividad*. Paidós,, 1990, no. 159.954.
- [92] M. C. Maldonado and E. R. Arzate, *TRIZ, la metodología más moderna para inventar o innovar tecnológicamente de manera sistemática*. Panorama Editorial, 2005.

- [93] E. Yacuzzi and F. Mart[in, “Qfd: Conceptos, aplicaciones y nuevos desarrollos,” Serie Documentos de Trabajo, Universidad del CEMA: Área: negocios, Tech. Rep., 2003.
- [94] O. R. Lazo and L. R. Rojas, “Diseño asistido por computador,” *Industrial Data*, vol. 9, no. 1, pp. 007–015, 2006.
- [95] F. de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. (2006) El teorema de los trabajos virtuales y sus aplicaciones. [Online]. Available: http://apuntes.foros-fiuba.com.ar/apuntes/64/01/294-Teorema_de_los_Trabajos_Virtuales.html
- [96] R. Soto Ramírez. (2006) Cómo diseñar un cuestionario de investigación de mercados. [Online]. Available: <http://www.gestiopolis.com/como-disenar-un-cuestionario-de-investigacion-de-mercados/>
- [97] V. Fey and E. Rivin, *Innovation on demand: new product development using TRIZ*. Cambridge University Press, 2005.
- [98] J. L. BKin and M. Sadeghi, “Mechanical efficiency of two commercial lever propulsion mechanisms for manual wheelchair locomotion,” *Journal of rehabilitation research and development*, vol. 50, no. 10, p. 1363, 2013.
- [99] A. G. Felipe, V. A. Lapiedra, J. M. A. Zarate, A. G. Armijo, E. A. R. Calvo, and J. B. Hernández, “Los límites del sistema mano-brazo: la carga física de trabajo en extremidades superiores,” *Mapfre seguridad*, vol. 26, no. 101, pp. 30–39, 2006.
- [100] W. J. Hurd, M. M. Morrow, K. R. Kaufman, and K.-N. An, “Wheelchair propulsion demands during outdoor community ambulation,” *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 19, no. 5, pp. 942–947, 2009.
- [101] H. R. Galbarro. (2016) Transmisión por cadenas cálculo y diseño. [Online]. Available: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn127.html>
- [102] J. T. C. Lizarza, *Método de los elementos finitos para análisis estructural*. Escuela Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Navarra, 2000.
- [103] C. R. i Romeva, *Selección de materiales en el diseño de máquinas*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica, 2010, vol. 181.

- [104] Ingemecánica. (2014) Transmisión por cadenas cálculo y diseño. [Online]. Available: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn127.html>

Apéndices

Apéndice A

Cuestionario aplicado a los usuarios de sillas de ruedas encuestados



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ING. MARIO ALBERTO PEÑALOZA VALDÉS



Este cuestionario forma parte de una investigación desarrollada por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, con el objetivo de recabar información sobre usuarios de sillas de ruedas (necesidades, expectativas, preferencias, sugerencias), útil para el desarrollo del proyecto titulado “*Diseño de un sistema mecánico de propulsión asistida para sillas de ruedas manuales*”. La información obtenida será utilizada para poder establecer las características y especificaciones importantes para el diseño del nuevo sistema.

Encuesta.

Edad:

Género: () Masculino

() Femenino

1. ¿Hace cuánto tiempo utiliza silla de ruedas?

- () Menos de 1 año
- () Entre 1 a 3 años
- () Entre 3 a 5 años
- () Mas de 5 años

2. ¿Cuál es el tipo de discapacidad o enfermedad que sufre?

3. ¿Recibió algún tipo de entrenamiento o capacitación para impulsarse **correctamente** en la silla de ruedas manual? () Si () No ¿De que tipo?

4. ¿Tiempo aproximado que utiliza trasladándose en la silla de ruedas manual al día?

- o () Menos de 2 horas.
- o () De 2 a 5 horas
- o () De 5 a 8 horas
- o () Más de 8 horas.

5. ¿Qué es lo que le agrada y desagrada de utilizar el aro en el exterior de la rueda para impulsarse?
6. ¿Qué dificultades tiene para realizar sus actividades diarias utilizando el aro en el exterior de la rueda para impulsarse?
7. ¿Ha sentido cansancio o fatiga en los brazos después de impulsarse en su silla de ruedas? () Si () No ¿Después de cuánto tiempo?
8. ¿Cómo calificaría el cansancio o fatiga que siente en los brazos después de impulsarse en su silla de ruedas?

Muy poco	Poco	Moderado	Mucho	Demasiado

9. ¿Presenta usted algún problema físico en manos u hombros originado por usar los brazos para impulsarse? () Si () No ¿Qué tipo de problema?
10. ¿Qué dificultades tiene al subir una rampa con su silla de ruedas?
11. La exigencia física para subir una rampa en su silla de ruedas comparándola con la necesaria para trasladarse en suelo plano es:
- () La misma
 - () Dos veces más
 - () Tres veces más
 - () Cuatro veces más
 - Otro _____
12. ¿Conoce otras maneras o dispositivos auxiliares para desplazarse en su silla de ruedas que no sean eléctricas? () Si () No ¿Cuáles?

13. ¿Qué mejoraría de la manera para impulsarse utilizando el aro al exterior de las ruedas?

14. De los dispositivos mostrados **a y b**. ¿Qué método alternativo para impulsarse considera mejor? () **a** () **b** ¿Porque?

a) Propulsión por palancas: se utiliza una palanca a cada lado, moviéndola hacia adelante y atrás, haciendo girar las ruedas independientemente.

b) Propulsión por crank o handcycle: utiliza un sistema de manivela junto con una tercer rueda, que se acopla a la silla de ruedas. Con un movimiento circular de las manos y brazos se hace girar la tercera rueda mediante una transmisión similar a la de una bicicleta.



a) Propulsión con palancas.



b) Crank o handcycle.

15. ¿Qué recomendaciones haría usted para mejorar la manera que se utiliza para impulsarse utilizando el aro al exterior de la rueda?

16. ¿Tiene usted alguna sugerencia para el diseño de un nuevo sistema para impulsarse en su silla de ruedas?

17. ¿Estaría dispuesto a comprar un dispositivo de asistencia que reduzca el esfuerzo y movimiento necesario para propulsarse en comparación al convencional? Sí_____ No_____ ¿cuánto pagaría por él? (Tomando como precio base de la silla 5000 pesos)

- Entre 500 y 1500.pesos
- Entre 1500 y 2500 pesos
- Entre 2500 y 3500 pesos
- Entre 3500 y 4500 pesos
- Más de 4500 pesos

18. Seleccione las 5 características más importantes que debería tener el nuevo dispositivo para impulsarse en su silla de ruedas. Coloque un número del 1 al 5 de acuerdo a la importancia que usted considere, siendo 5 la menos importante y 1 la más importante.

- Tamaño**, que no sea tan grande como para estorbar al usuario.
- Peso**, que no se le agregue demasiado peso a la silla de ruedas.
- Fuerza empleada**, que reduzca la fuerza necesaria para impulsarse en comparación con la empleada para impulsarse.
- Facilidad de uso**, que su uso no sea complicado y difícil para el usuario.
- Adaptabilidad**, que sea ajustable para diferentes sillas de ruedas así como para las características específicas del usuario.
- Instalación**, que sea capaz de instalarse solo con herramientas simples (desarmador pinzas, etc).
- Mantenimiento**, que el mantenimiento del dispositivo tome menos de 15 minutos, utilizando herramientas simples (desarmador, pinzas, etc).
- Seguridad**, que sea seguro de utilizar.
- Maniobrabilidad**, que sea fácil de maniobrar tanto en exteriores (parques, calles, banquetas, etc), como en interiores (casa, oficina, escuela, etc)
- Costo y accesibilidad**, que su precio no sea elevado y que sea accesible para los usuarios.

19. De acuerdo con los conceptos establecidos anteriormente, cómo calificaría las siguientes características con respecto al aro en el exterior de la rueda y la manera de impulsarse.

	Muy malo	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno
Tamaño					
Peso					
Fuerza empleada					
Facilidad de uso					
Adaptabilidad					
Instalación					
Mantenimiento					
Seguridad					
Maniobrabilidad					
Costo y accesibilidad					

Apéndice B

Matriz de contradicciones

Apéndice C

Programa de síntesis y análisis hecho en Mathematica 9.0

Mecanismo de 4 barras de la propuesta seleccionada

Funciones

```
MDP[θ12_, P1_, P2_] := {
  {Cos[θ12], -Sin[θ12],
   P2[[1]] - (P1[[1]] * Cos[θ12] - P1[[2]] * Sin[θ12])},
  {Sin[θ12], Cos[θ12], P2[[2]] -
   (P1[[1]] * Sin[θ12] + P1[[2]] * Cos[θ12])},
  {0, 0, 1}};
(*Función para definir la matriz de posición*)
R[θ_] := {{Cos[θ], -Sin[θ]}, {Sin[θ], Cos[θ]}};
(*Función para definir la matriz de velocidad*)
V[ω_] := {{0, -ω}, {ω, 0}};
(*Función para definir la matriz de aceleración*)
A[ω_, α_] := {{-ω^2, -α}, {α, -ω^2}};
Barra[espesor_, rojo_, verde_, azul_, linea_] :=
  Graphics[{AbsoluteThickness[espesor],
    RGBColor[rojo, verde, azul], linea}];
R2D[R_] := {R[[1]], R[[2]}};
(*Producto cruz*)
R_⊗F_ := R[[1]] * F[[2]] - R[[2]] * F[[1]];
```

Datos

```
(*Datos elegidos libremente por el diseñador*)

NSoluciones = 10;

a0y = 0;
b0x = 0.5;
b0y = 0;

a0 = {a0x, a0y, 1};
a1 = {a1x, a1y, 1};
b0 = {b0x, b0y, 1};
b1 = {b1x, b1y, 1};

(*Angulo inicial de la palanca*)
ψ = 85 * Degree;
ε = 90 * Degree;
φ = 100 * Degree;
ϕ = 70 * Degree;

(*Valores maximos de magnitudes en los elementos*)
E0 = 0.25;
E1 = 0.1;
E2 = 2;
E3 = 0.4;

β12 = 20 * Degree;
β13 = 40 * Degree;

(*Valor maximo y minimo del angulo de
transmision considerados como aceptables*)
ATmin = 50 * Degree;
ATmax = 130 * Degree;
```

Ecuación de trabajo virtual

```

(*Se define el vector de cambio virtual*)
δRf = {0, 0};

(*Se define la matriz que contienen
los desplazamientos virtuales δσ2 y δσ3*)
MatrizA = {{-(b1y - b0y), (b1y - a1y)},
           {(b1x - b0x), -(b1x - a1x)}};

(*Se establece el vector b, que contiene δσ1*)
Vectorb = {-(a1y - a0y), (a1x - a0x)} * δσ1;

(*Se pone δσ2 y δσ3 en función de δσ1,
invirtiendo la matriz*)
{δσ3, δσ2} = Inverse[MatrizA].Vectorb;

(*Se define la ecuación del trabajo virtual*)
δWS = Fe.δRf + Te * δσ3 + Ts * δσ1;

(*En equilibrio estático la Ectv es igual a cero,
se puede factorizar el δσ1 y posteriormente cancelarlo,
o lo que es lo mismo, asignarle un valor δσ1=1*)
ETVS = δWS /. δσ1 → 1;

```

Ecuaciones de diseño

```

a2 = MDP[θ12, a0, a0].a1;
a3 = MDP[θ13, a0, a0].a1;

b2 = MDP[β12, b0, b0].b1;
b3 = MDP[β13, b0, b0].b1;

Ec1 = (a1 - b1) . (a1 - b1) - (a2 - b2) . (a2 - b2);
Ec2 = (a1 - b1) . (a1 - b1) - (a3 - b3) . (a3 - b3);

Ec3 = (b1x - b0x) * Tan[ψ] - (b1y - b0y);

EcAT = Cos[φ] * (Sqrt[(a1x - a0x) ^ 2 + (a1y - a0y) ^ 2]) *
  (Sqrt[(b1x - a1x) ^ 2 + (b1y - a1y) ^ 2]) - (a1x - a0x);

EcLC = (Norm[R2D[a1 - a0]]) ^ 2 + (Norm[R2D[b1 - a1]]) ^ 2 -
  (Norm[R2D[b1 - b0]]) ^ 2 - (Norm[R2D[b0 - a0]]) ^ 2 +
  2 * Norm[R2D[a1 - a0]] * Norm[R2D[b1 - a1]] * Cos[ε] -
  2 * Norm[R2D[b1 - b0]] * Norm[R2D[b0 - a0]] * Cos[φ];

Ec4 = (a1x - a0x) * Tan[φ] - (a1y - a0y);

FuncionObjetivo = Ec1 ^ 2 + Ec2 ^ 2 + Ec3 ^ 2;

```

Solución de ecuaciones de diseño

```

For[k1 = 1, k1 ≤ NSoluciones, k1 += 1,

  SolParcial = FindMinimum[
    FuncionObjetivo,
    {{a0x, Random[Real, {0, 0.5}]},
     {a1x, Random[Real, {0, 0.1}]},
     {a1y, Random[Real, {-0.1, 0.1}]},
     {b1x, Random[Real, {0, 8}]},
     {b1y, Random[Real, {0, 0.5}]},
     {θ12, RandomReal[{-2 * Pi, 2 * Pi}]},
     {θ13, RandomReal[{-2 * Pi, 2 * Pi}]},
     MaxIterations → 5000];

  (* Calculo de longitudes de los elementos *)

  L0 = Norm[R2D[b0 - a0]] /. SolParcial[[2]];
  L1 = Norm[R2D[a1 - a0]] /. SolParcial[[2]];

```

```
L2 = Norm[R2D[b1 - a1]] /. SolParcial[[2]];
L3 = Norm[R2D[b1 - b0]] /. SolParcial[[2]];
```

```
( * Ordenamiento de mayor a
  menor utilizando el metodo de burbuja *)
```

```
Longitudes = {L0, L1, L2, L3};
```

```
For[j = 1, j ≤ 3, j += 1,
  For[i = 1, i ≤ 3, i += 1,
    If[Longitudes[[i]] < Longitudes[[i + 1]],
      Temp = Longitudes[[i]];
      Longitudes[[i]] = Longitudes[[i + 1]];
      Longitudes[[i + 1]] = Temp;
    ];
  ];
];
```

```
(*Extracción y de la parte 2 de la solución
que cumple con la condición de grashof y
limitaciones dimensionales establecidas
y calculo del angulo de transmision*)
```

```
l = Longitudes[[1]];
c = Longitudes[[4]];
m = Longitudes[[2]];
n = Longitudes[[3]];
```

```
If[(1 + c) ≤ (m + n),
  If[0.05 ≤ L1 ≤ E1,
    If[0.1 ≤ L3 ≤ E3,
      If[L0 ≤ E0,
        If[b1y ≥ 0 /. SolParcial[[2]],
          γmin = ArcCos[
            (L2^2 + L3^2 - (L0 - L1)^2) / (2 * L2 * L3)] / Degree;
          If[γmin ≥ 40,
            γmax = ArcCos[
              (L2^2 + L3^2 - (L1 + L0)^2) / (2 * L2 * L3)] / Degree;
            If[γmax ≤ 140,
              VSolSint[k1] = SolParcial[[2]];
              Vγmax[k1] = γmax;
              Vγmin[k1] = γmin,
              k1 = k1 - 1
            ],
            k1 = k1 - 1
          ],
        ],
      ],
    ],
  ],
```

```

      k1 = k1 - 1
    ],
    k1 = k1 - 1
  ],
  k1 = k1 - 1
],
k1 = k1 - 1
],
k1 = k1 - 1
]
]
]

```

Global`Vγmin

Vγmin[1] = 40.5349

Vγmin[2] = 41.3443

Vγmin[3] = 40.1835

Vγmin[4] = 43.9644

Vγmin[5] = 44.1276

Vγmin[6] = 43.5458

Vγmin[7] = 41.7681

Vγmin[8] = 47.8432

Vγmin[9] = 46.5839

Vγmin[10] = 43.4223

.

?? Vγmax

```
Global`Vγmax
```

```
Vγmax[1] = 84.1135
```

```
Vγmax[2] = 125.73
```

```
Vγmax[3] = 80.4537
```

```
Vγmax[4] = 86.4453
```

```
Vγmax[5] = 85.7469
```

```
Vγmax[6] = 133.926
```

```
Vγmax[7] = 80.0163
```

```
Vγmax[8] = 91.0926
```

```
Vγmax[9] = 112.004
```

```
Vγmax[10] = 85.7854
```

VSolSint[4]

```
{a0x → 0.256319, a1x → 0.294529, a1y → 0.0519284,  
 b1x → 0.516128, b1y → 0.184342, θ12 → 4.74602, θ13 → -2.5681}
```

Visualización

```
(*En esta sección se visualizan  
 las diferentes soluciones que cumplieron  
 con las restricciones establecidas.*)  
For[k2 = 1, k2 ≤ NSoluciones, k2 += 1,  
  
  r0 = R2D[a0] /. VSolSint[k2];  
  r0p = R2D[b0] /. VSolSint[k2];  
  r1 = R2D[a1 - a0] /. VSolSint[k2];  
  r2 = R2D[b1 - a1] /. VSolSint[k2];  
  r3 = R2D[b1 - b0] /. VSolSint[k2];  
  
  (*Creación de las líneas*)  
  linear1 = Line[{r0, r0 + r1}];  
  linear2 = Line[{r0 + r1, r0p + r3}];  
  linear3 = Line[{r0p + r3, r0p}];  
  
  (*A las líneas se les da color y espesor,  
  con la función "Barra",  
  definida al inicio del programa*)  
  barrar1 = Barra[7, 1, 0.2, 0.2, linear1];  
  barrar2 = Barra[7, 0.5, 0.2, 0.2, linear2];  
  barrar3 = Barra[7, 1, 1, 0.2, linear3];  
  barrar4 = Barra[7, 1, 1, 0.2, linear4];
```

```

(*Se definen los puntos de todos los pivotes*)
puntoa0 = Point[r0];
puntoa1 = Point[r0 + r1];
puntob0 = Point[r0p];
puntob1 = Point[r0p + r3];

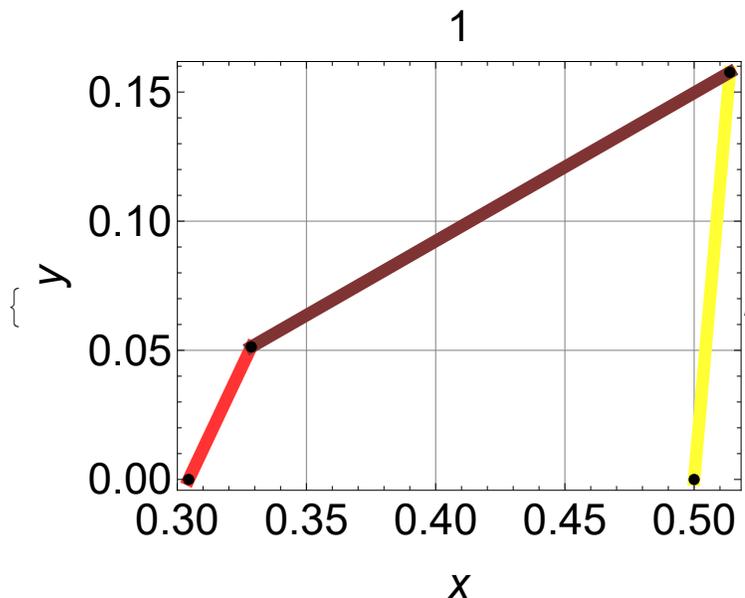
(*A los puntos creados anteriormente,
se les asigna un tamaño*)

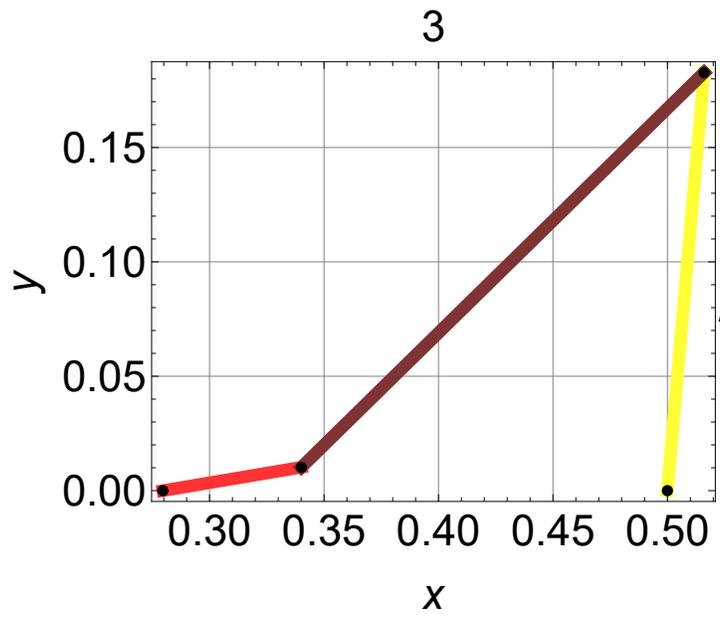
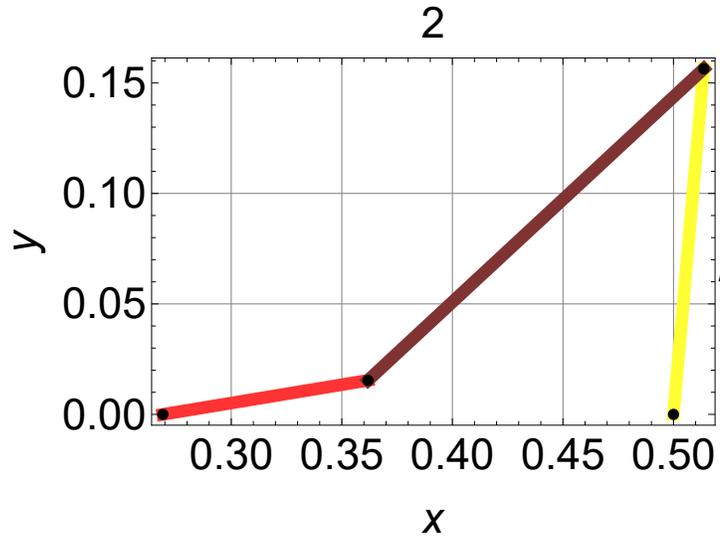
pernoa0 = Graphics[{PointSize[0.02], puntoa0}];
pernoa1 = Graphics[{PointSize[0.02], puntoa1}];
pernob0 = Graphics[{PointSize[0.02], puntob0}];
pernob1 = Graphics[{PointSize[0.02], puntob1}];

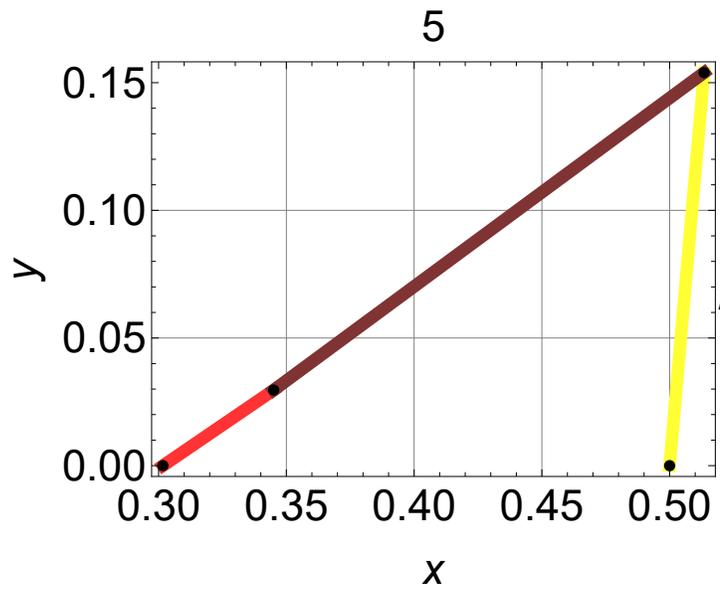
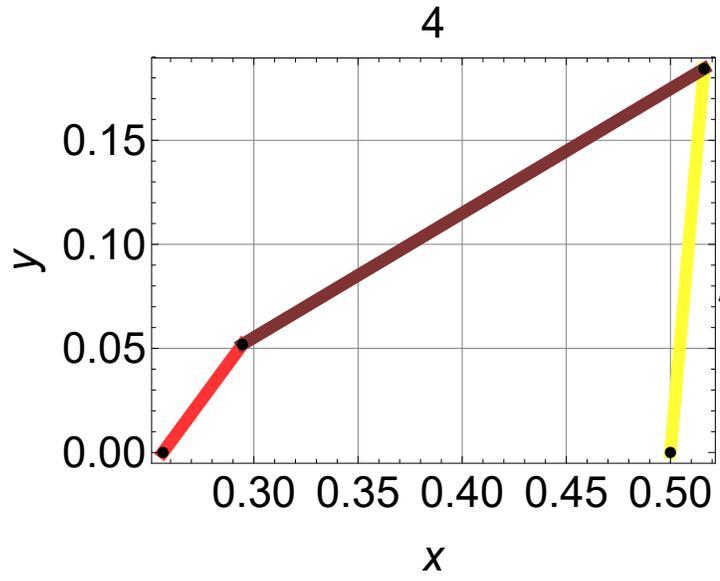
(*Se muestran todas las geometrias construidas*)
Visualizacion[k2] =
Show[barrar1, barrar3, barrar2, pernoa0, pernoa1,
pernob0, pernob1, ImageSize -> 400, Frame -> True,
GridLines -> Automatic, FrameLabel -> {x, y, k2},
BaseStyle -> {24, FontFamily -> "Arial"}];
]

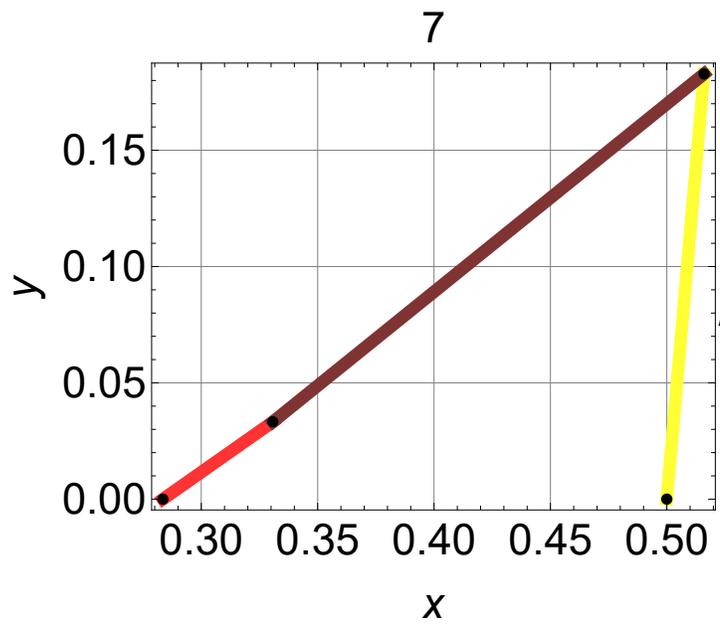
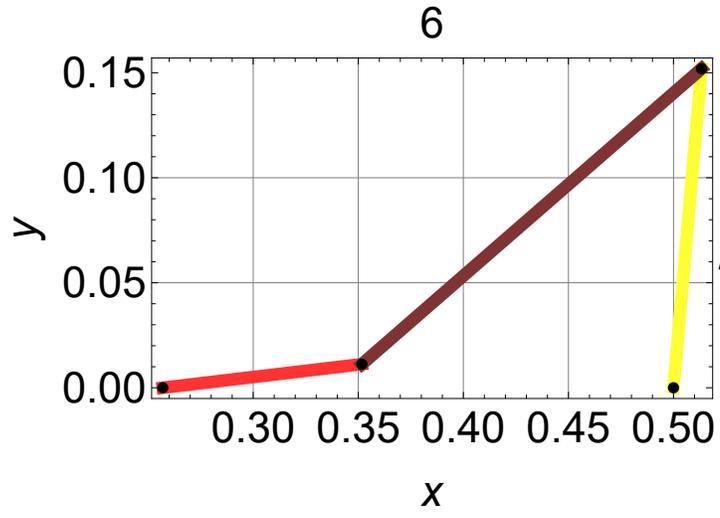
Table[Visualizacion[k2], {k2, 1, NSoluciones, 1}]

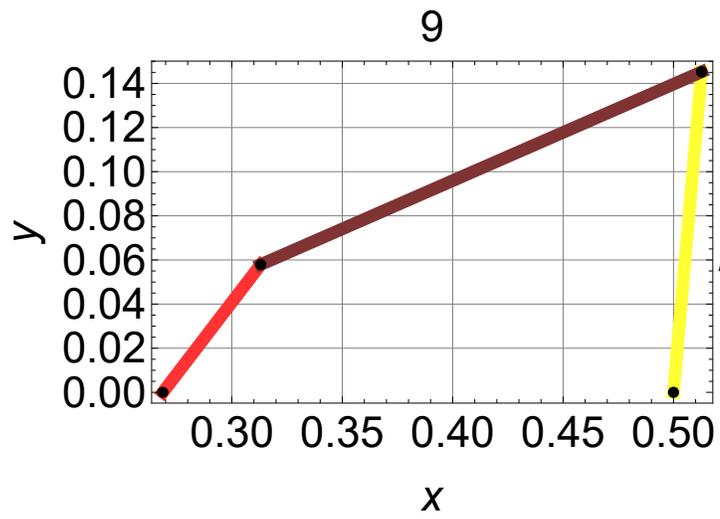
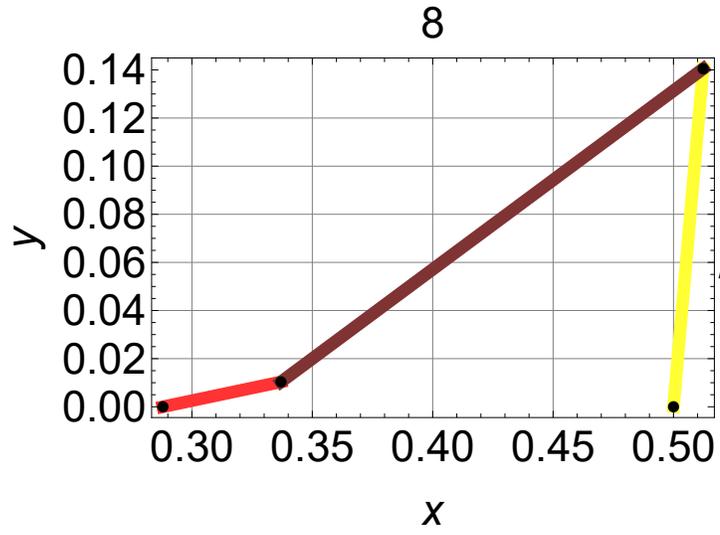
```

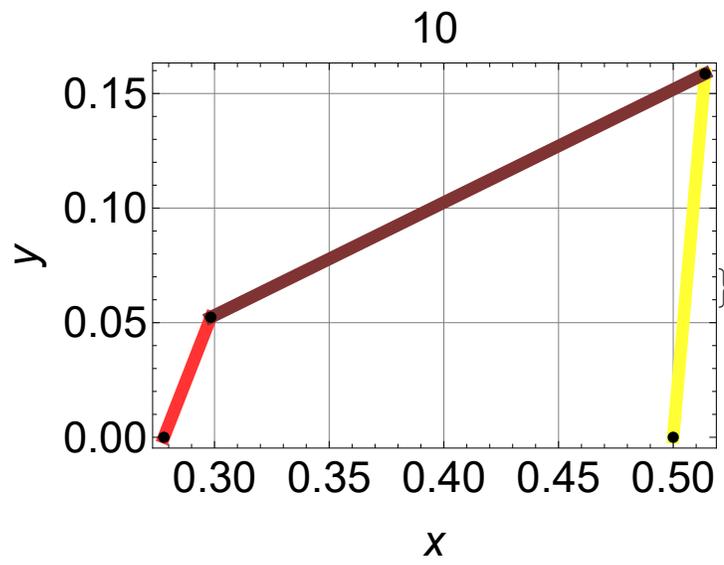












Análisis

Ecuaciones

```

Clear[θ1, θ2, θ3]

k3 = 4;

r0 = R2D[a0] /. VSolSint[k3];
r0p = R2D[b0] /. VSolSint[k3];
r1 = R2D[a1 - a0] /. VSolSint[k3];
r2 = R2D[b1 - a1] /. VSolSint[k3];
r3 = R2D[b1 - b0] /. VSolSint[k3];

(*Definicion de vectores de posición*)
R0 = r0;
R0p = r0p;
R1 = R[θ1].r1;
R2 = R[θ2].r2;
R3 = R[θ3].r3;

(*Definicion de vectores de velocidad*)

V1 = V[ω1].R1;
V2 = V[ω2].R2;
V3 = V[ω3].R3;

(*Definicion de vectores de aceleración*)

A1 = A[ω1, α1].R1;
A2 = A[ω2, α2].R2;
A3 = A[ω3, α3].R3;

(*Ecuación de Posición*)

EcPos1 = R0 + R1 + R2 - R3 - R0p;

(*Ecuación de Velocidades*)

EcVel1 = V1 + V2 - V3;

(*Ecuación de Aceleración*)

EcAcel1 = A1 + A2 - A3;

```

Longitudes de los elementos de la solución k3

```

L0 = Norm[R2D[b0 - a0]] /. SolParcial[[2]]
L1 = Norm[R2D[a1 - a0]] /. SolParcial[[2]]
L2 = Norm[R2D[b1 - a1]] /. SolParcial[[2]]
L3 = Norm[R2D[b1 - b0]] /. SolParcial[[2]]
0.222059
0.056221
0.240239
0.159207

```

Solución

Posición

```

θ2i = 0;
θ3i = 0;
(*Ciclo "For" para realizar el cálculo
para todo el giro de la manivela de entrada*)
For[i = 0, i ≤ 360, i += 1,

  (*Se establece el valor de la entrada,
  incremento de un grado*)
  θ1 = i * Degree;

  (*Se usa FindRoot porque es una ecuación no lineal*)
  SolPos[i] = FindRoot[{
    EcPos1 == 0},

    {{θ2, θ2i},
     {θ3, θ3i}}];

  θ2i = θ2 /. SolPos[i];
  θ3i = θ3 /. SolPos[i];

]

```

Velocidad

```
(*Ciclo similar que para la posición*)
For[i = 0, i ≤ 360, i += 1,

  θ1 = i * Degree;
  (*Se usa el comando solve
  puesto que son ec.uaciones lineales*)
  SolVel[i] = Solve[{EcVel1 == 0} /. SolPos[i],
    (*Se debe vaciar los valores de los ángulos,
    dichos valores se encuentran en la variable SolPos*)
    {ω2, ω3}
  ]
]
```

Aceleración

```
For[i = 0, i ≤ 360, i += 1,
  θ1 = i * Degree;
  SolAcel[i] =
    Solve[{EcAcel1 == 0} /. SolPos[i] /. SolVel[i] // Flatten,
      (*Se debe vaciar los valores de los ángulos
      y velocidades angulares, dichos valores se
      encuentran en la variable SolPos y SolVel*)
      (*Se usa el comando Flatten para quitar
      el exceso de llaves{ }*) {α2, α3}
    ]
]
```

Tablas y Gráficas

(*Se crea una tabla con dos columnas, θ_1 vs θ_3 *)

Tabla $\theta_1\theta_3$ =

```
Table[{j,  $\theta_3$ /Degree /. SolPos[j]}, {j, 0, 360, 1}];
```

(*Se plotean los puntos de la tabla,
creando una gráfica*)

```
ListLinePlot[Tabla $\theta_1\theta_3$ , AxesLabel  $\rightarrow$  {" $\theta_1$ ", " $\theta_3$ "}]
```

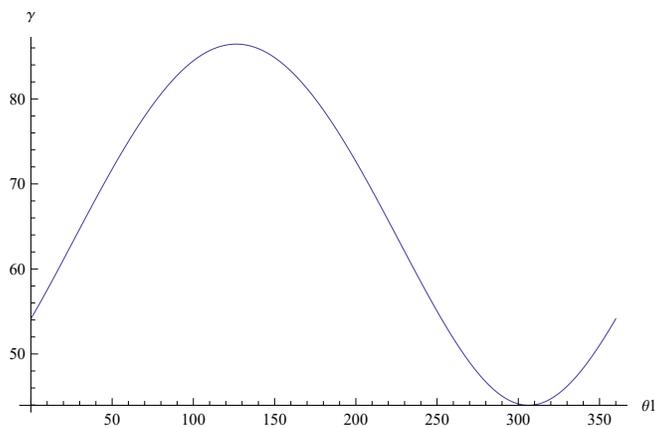
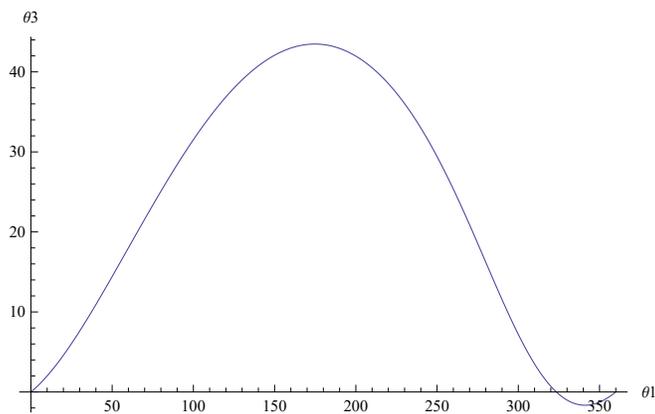
```
 $\gamma$  = ArcCos[((-R2) . (-R3)) / (Norm[R2] * Norm[R3])];
```

(*Se crea una tabla con dos columnas, θ_1 vs γ *)

Tabla $\theta_1\gamma$ =

```
Table[{j,  $\gamma$ /Degree /. SolPos[j]}, {j, 0, 360, 1}];
```

```
ListLinePlot[Tabla $\theta_1\gamma$ , AxesLabel  $\rightarrow$  {" $\theta_1$ ", " $\gamma$ "}]
```



Animación

```

Clear[ $\theta_1$ ];
Animate[
   $\theta_1 = k * \text{Degree};$ 
  (*Se crean líneas, luego se hacen gráficas,
  se agrega espesor y color*)

  Linear1 = Line[{R0, R0 + R1}] /. SolPos[k];
  Linear2 = Line[{R0 + R1, R0p + R3}] /. SolPos[k];
  Linear3 = Line[{R0p + R3, R0p}] /. SolPos[k];

  Barrar1 = Barra[7, 1, 0.2, 0.2, Linear1];
  Barrar2 = Barra[7, 0.5, 0.2, 0.2, Linear2];
  Barrar3 = Barra[7, 1, 1, 0.2, Linear3];

  Puntoa0 = Point[R0] /. SolPos[k];
  Puntoa1 = Point[R0 + R1] /. SolPos[k];
  Puntob0 = Point[R0p] /. SolPos[k];
  Puntob1 = Point[R0p + R3] /. SolPos[k];

  Pernoa0 = Graphics[{PointSize[0.02], Puntoa0}];
  Pernoal = Graphics[{PointSize[0.02], Puntoa1}];
  Pernob0 = Graphics[{PointSize[0.02], Puntob0}];
  Pernobl = Graphics[{PointSize[0.02], Puntob1}];

  (*Se muestran todos los cuerpos en la misma ventana*)
  Show[Barrar1, Barrar3, Barrar2, Pernoal, Pernoal,
    Pernob0, Pernobl, PlotRange -> {{0, 0.7}, {-0.15, 0.4}},
    Frame -> True, FrameLabel -> {x, y}, GridLines -> Automatic,
    BaseStyle -> {24, FontFamily -> "Arial"}]

, {k, 0, 360, 1}]

```

Análisis Estático (Método de Newton)

Datos

```
(*Angulo que genera el
vector r3 con el eje x positivo*)
phi3 = ArcTan[(b1[[2]] - b0[[2]]) / (b1[[1]] - b0[[1]])];

(*Orientación de la fuerza, en función del angulo theta3*)
(*Recordar que la fuerza es perpendicular
a la línea sobre la cual se aplica*)
F = 667.3 * {Cos[phi3 - 90 * Degree + theta3], Sin[phi3 - 90 * Degree + theta3]};
```

Variables

```
Clear[theta1]
F01 = {f01x, f01y};
F03 = {f03x, f03y};
F12 = {f12x, f12y};
F23 = {f23x, f23y};
```

Ecuaciones

```
Clear[theta1]
EcEFC1 = F01 + F23;
EcEMC1 = R1 ⊗ F12 + Tn;

EcEFC2 = F23 - F12;
EcEMC2 = R2 ⊗ F23;

EcEFC3 = F03 + F - F23;
EcEMC3 = R3 ⊗ (F - F23);
```

Solución de ecuaciones estáticas para todas las posiciones

```
(*Se resuelven las 9 ecuaciones estáticas,
para cada una de las posiciones del mecanismo*)
Clear[θ1]

For[i = 0, i ≤ 360, i += 1,

  θ1 = i * Degree;
  SolFEstaticasNewton[i] = Solve[{
    EcEFC1 == 0,
    EcEMC1 == 0,
    EcEFC2 == 0,
    EcEMC2 == 0,
    EcEFC3 == 0,
    EcEMC3 == 0} /. SolPos[i] /. VSolSint[k3] // Flatten
    , {f01x, f01y, f03x, f03y, f12x, f12y, f23x, f23y, Tn}] //
  Flatten
]
SolFEstaticasNewton[1]
{f01x → -439.958, f01y → -261.246, f03x → 25.0367, f03y → 296.306,
 f12x → 439.958, f12y → 261.246, f23x → 439.958, f23y → 261.246, Tn → 13.3923}
```

Análisis estático (Método de Trabajo Virtual)

Datos

Ecuaciones

```

Clear[θ1]
(*Se definen los puntos en función de
  vectores R's que pueden cambiar de posición*)

(*Se define el vector de cambio virtual*)
δRf = {-R3[[2]] * δσ3, R3[[1]] * δσ3};

(*Se define la matriz que contienen
  los desplazamientos virtuales δσ2 y δσ3*)
MatrizA = {{-R3[[2]], R2[[2]]}, {R3[[1]], -R2[[1]]}};

(*Se establece el vector b, que contiene δσ1*)
Vectorb = {-R1[[2]], R1[[1]]} * δσ1;

(*Se pone δσ2 y δσ3 en función de δσ1,
  invirtiendo la matriz*)
{δσ3, δσ2} = Inverse[MatrizA].Vectorb;

(*Se define la ecuación del trabajo virtual*)
δWA = F.δRf + Ttv * δσ1;

(*En equilibrio estático la Ectv es igual a cero,
  se puede factorizar el δσ1 y posteriormente cancelarlo,
  o lo que es lo mismo, asignarle un valor δσ1=1*)
ETVA = δWA /. δσ1 → 1;

```

Solución de ecuación de trabajo virtual para todas las posiciones

```
Clear[θ1]
(*Se resuelve la ecuación de trabajo virtual
para las 360 posiciones de la manivela,
los resultados se almacenan en una variable*)
For[i = 0, i ≤ 360, i += 1,
  θ1 = i * Degree;
  SolFEstaticasTV[i] = Solve[
    ETVA == 0 /. SolPos[i] /. VSolSint[k3], {Ttv}] // Flatten
]
SolFEstaticasTV[2]
{Ttv → 13.9393}
```

Gráficas del método de trabajo virtual y método de newton

(*Tabla para mostrar los valores de par de torsión 1*)

TablaTV =

```
Table[{j, Ttv /. SolFEstaticasTV[j]}, {j, 0, 360, 1}];
```

GraficaTV = ListLinePlot[TablaTV,

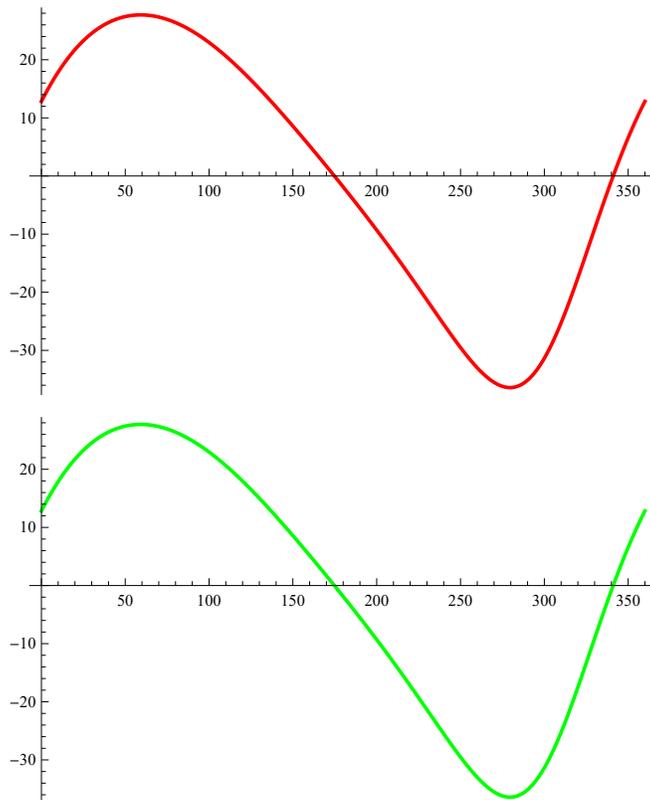
```
PlotStyle -> {AbsoluteThickness[2], RGBColor[1, 0, 0]}]
```

TablaN =

```
Table[{j, Tn /. SolFEstaticasNewton[j]}, {j, 0, 360, 1}];
```

GraficaN = ListLinePlot[TablaN,

```
PlotStyle -> {AbsoluteThickness[2], RGBColor[0, 1, 0]}]
```



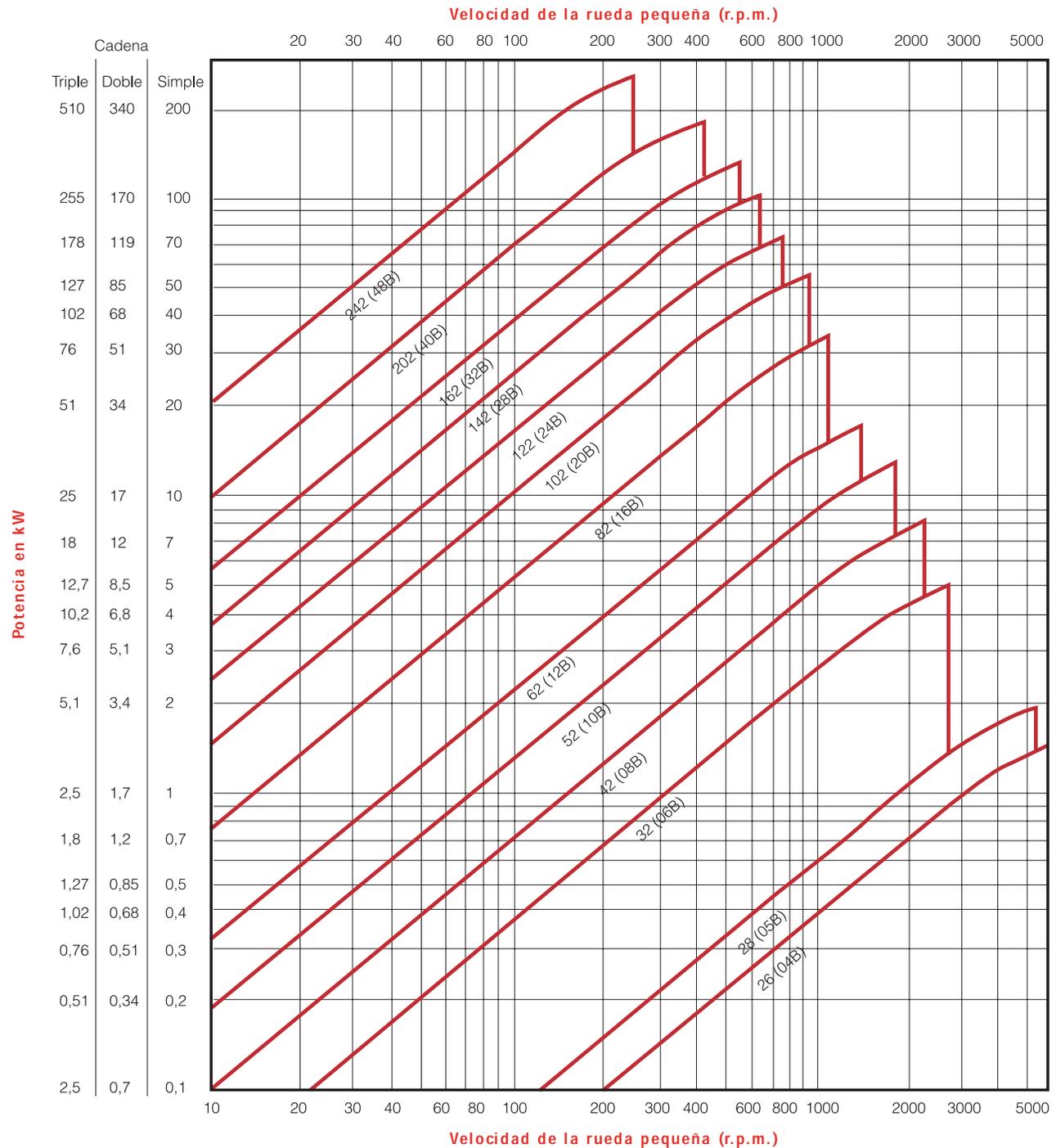
Apéndice D

Gráfico para la selección de cadenas Norma ISO 606 (Serie Europea)

Cálculo de una transmisión por cadena

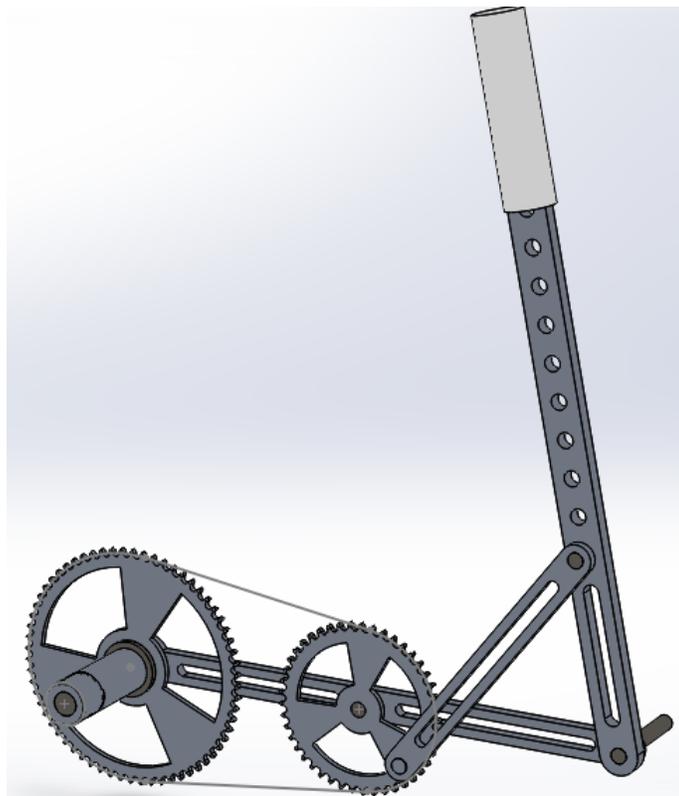
Gráfico para la selección de cadenas Norma ISO 606 (Serie europea)

Tabla N° V



Apéndice E

Planos de dibujo



1 2 3 4 5 6 7 8

F

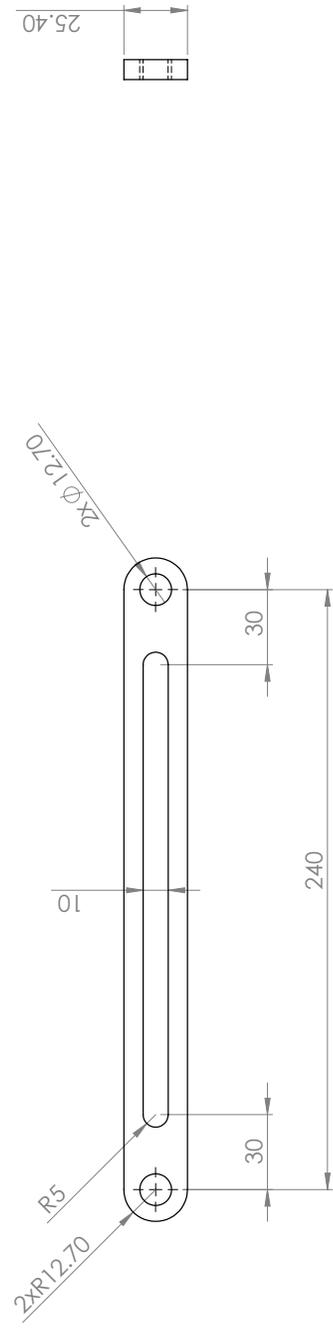
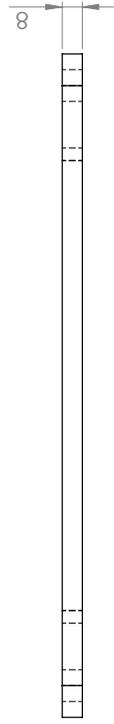
E

D

C

B

A



SI NO SE INDICALO CONTRARIO: ACABADO SUPERFICIAL EN MM TOLERANCIAS: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y REBARBAR VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN	01
DIBUJ.:		VERE.:	FECHA:	INSTITUCIÓN: FACULTAD DE INGENIERÍA		
APROB.:		FABR.:	PROYECCIÓN:	PIEZA: Barra conectora		
CALID.:		MATERIAL:	MATERIAL:	IDENTIFICADOR: FI-UAEMEX-2		
				ESCALA:1:2		
				HOJA 1 DE 1		

1 2 3 4 5 6 7 8

F

E

D

C

B

A

1 2 3 4 5 6 7 8

F

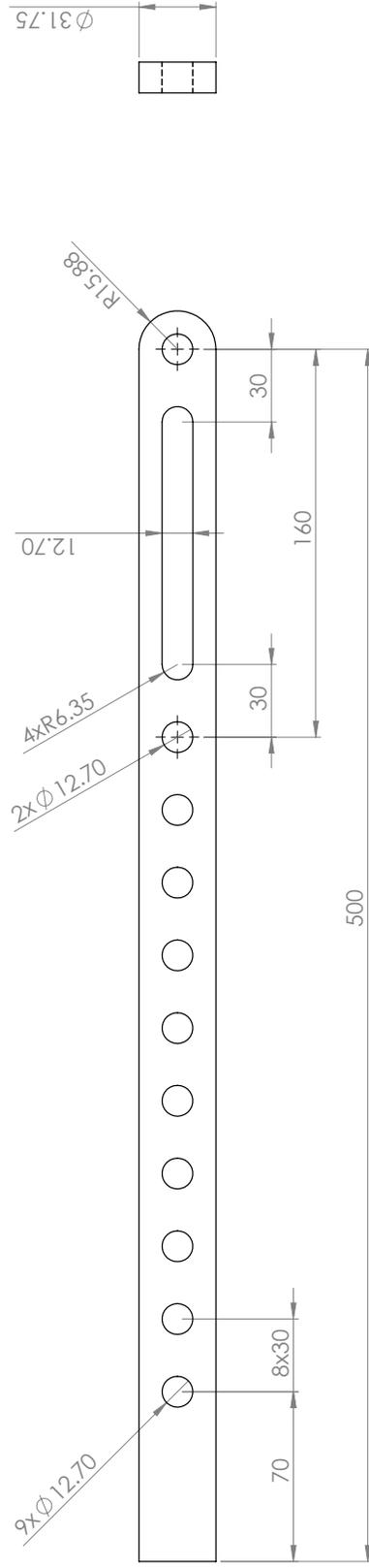
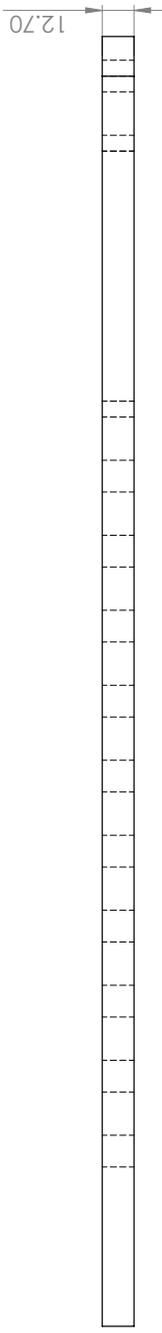
E

D

C

B

A



SIN SE INDICA LO CONTRARIO: ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: ±0.01 mm. ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y REPARAR VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN	01
INSTITUCIÓN:			FACULTAD DE INGENIERÍA			
PIEZA:			Palanca			
MATERIAL:			Aluminio 6061-T4			
IDENTIFICADOR:			FI-UAEMEX-3			
ESCALA: 1:2			HOJA 1 DE 1			

1 2 3 4 5 6 7 8

F

E

D

C

B

A

1 2 3 4 5 6 7 8

F

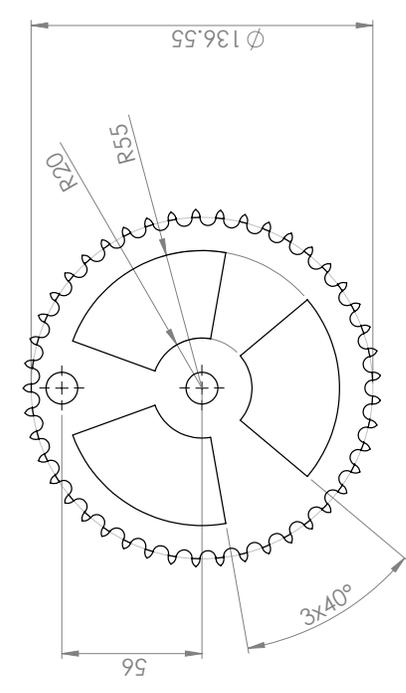
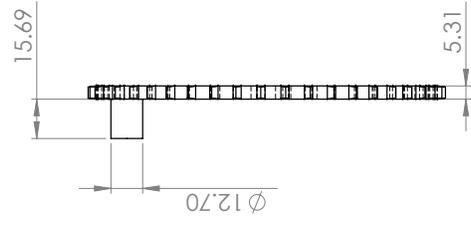
E

D

C

B

A



Paso: 9.525 mm.
 Numero de dientes: 45
 Diametro de barreno central: 12.7 mm.

SI NO SE INDICALO CONTRARIO: ACABADO: ACABADO EN MM TOLERANCIAS: ±0.01 mm. ANGULAR:		ACABADO: REBARBAR Y REBARBAR VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA REVISION 01
INSTITUCIÓN: FACULTAD DE INGENIERÍA		PIEZA: Piñon	
NOMBRE: DIBUJ. VERE. APROR. FABR. CALID.	FIRMA: FECHA: PROYECCIÓN: MATERIAL: Aluminio 6061-T4	IDENTIFICADOR: FI-UAEMEX-4	A3
ESCALA: 1:2		HOJA 1 DE 1	

1 2 3 4 5 6 7 8

F

E

D

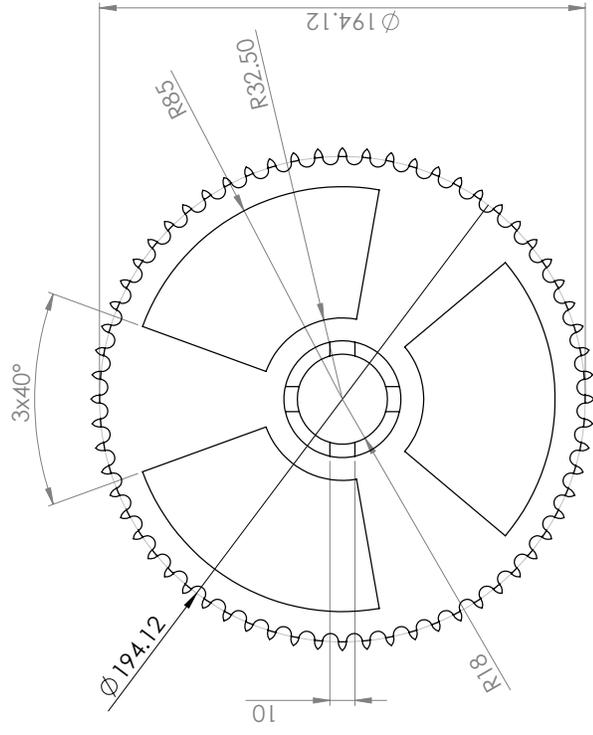
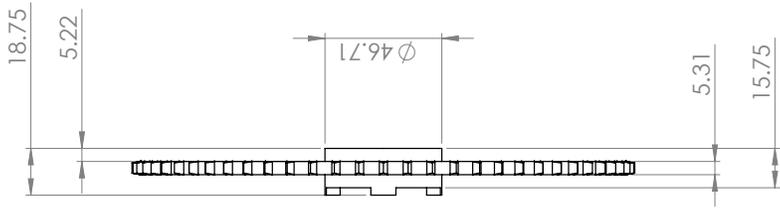
C

B

A

1 2 3 4 5 6 7 8

F E D C B A



Free Sprocket
 Paso: 9.525 mm.
 Número de dientes: 64
 Diámetro de barrenos central: 36 mm.

SI NO SE INDICALO CONTRARIO: ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: ANGULAR:		ACABADO: REBARBAR Y VIVAS	INSTITUCIÓN: FACULTAD DE INGENIERÍA	REVISIÓN: 01
NOMBRE: MARCO ALBERTO P. V.	FIRMA:	FECHA:	PIEZA: Rueda dentada de salida	IDENTIFICADOR: FI-UAEMEX-5
DIBUJ.:	VERIF.:	PROYECCIÓN: 	MATERIAL: Aluminio 6061-T4	A3
APROR.:	FABR.:	PESO:	ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1
CALID.:	ESCALA: 1:2	ESCALA: 1:2	ESCALA: 1:2	ESCALA: 1:2

1 2 3 4 5 6 7 8

F E D C B A

1 2 3 4 5 6 7 8

F F

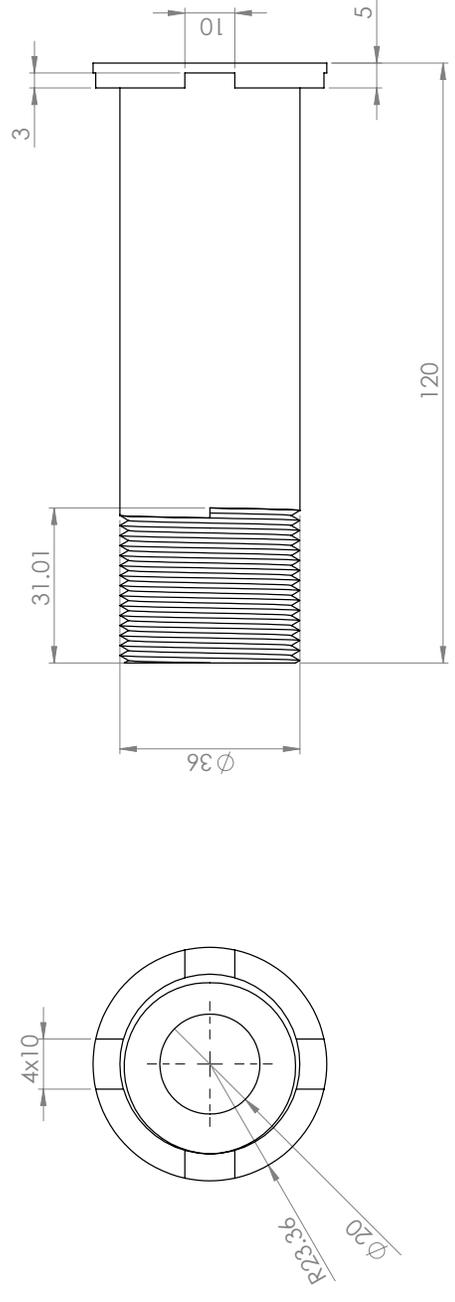
E E

D D

C C

B B

A A



Paso de cuerda: 4 mm.

SIN O SE INDICALO CONTRARIO: ACABADO: ACABADO SUPERFICIAL TOLERANCIAS: ±0.01 mm. ANGULAR:		ACABADO: REBARBAR Y REBARBAR Y VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA REVISION: 01
INSTITUCIÓN: FACULTAD DE INGENIERÍA		PIEZA: Acoplador	
NOMBRE: DIBUJ.: VERE.: APROR.: FABR.: CALID.:	FIRMA: FECHA: PROYECCIÓN: MATERIAL: Aluminio 6061-T4	IDENTIFICADOR: FI-UAEMEX-6	A3
ESCALA: 1:2		HOJA: 1 DE 1	1

2 3 4 5 6 7 8

1 2 3 4 5 6 7 8

F

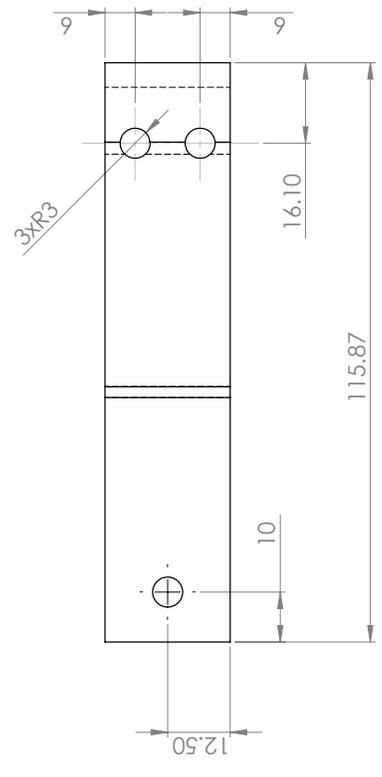
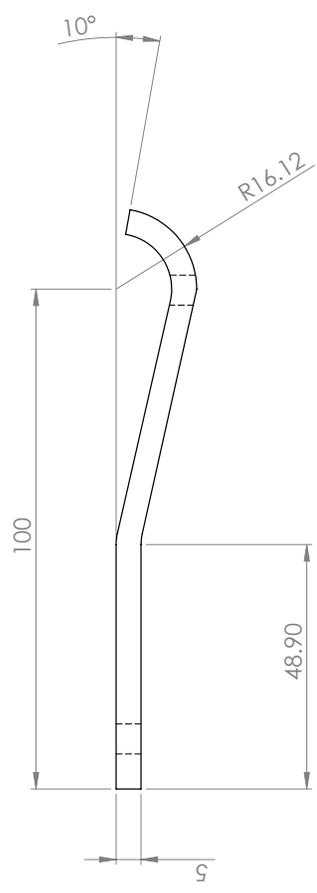
E

D

C

B

A



SIN O SE INDICALO CONTRARIO: ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: ANGULAR:		ACABADO: TOLERANCIAS: ANGULAR:	REPARAR Y REPARAR VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA INSTITUCIÓN: FACULTAD DE INGENIERÍA	REVISIÓN 01
NOMBRE: DIBUJ. VERIF. APROR. FABR. CALID.	FIRMA: FECHA: PROYECCIÓN: MATERIAL: Aluminio 6061-T4	IDENTIFICADOR: FI-UAEMEX-7	PIEZA: Soporte de frenos	ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1

1 2 3 4 5 6 7 8

F

E

D

C

B

A

1 2 3 4 5 6 7 8

F

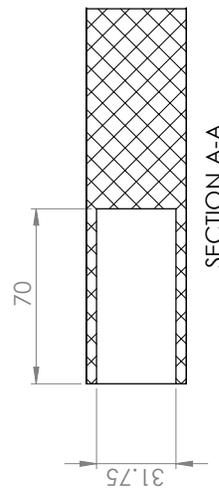
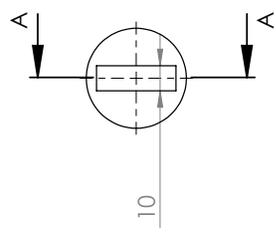
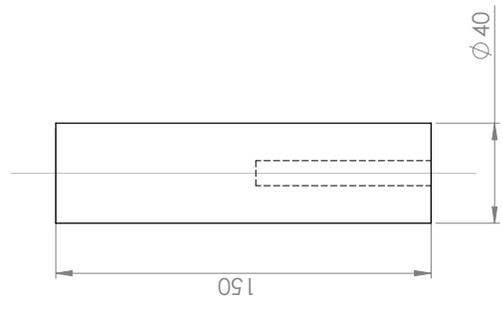
E

D

C

B

A



SI NO SE INDICALO CONTRARIO: ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: ANGULAR:		ACABADO: REBARBAR Y VIVAS	INSTITUCIÓN: FACULTAD DE INGENIERÍA	REVISIÓN: 01
NOMBRE: DIBUJ.: VERE.: APROR.: FABR.: CALID.:		FIRMA: FECHA: PROYECCIÓN: MATERIAL:	PIEZA: Empuñadura	IDENTIFICADOR: FI-UAEMEX-8
NOMBRE: DIBUJ.: VERE.: APROR.: FABR.: CALID.:		MATERIAL: ABS	ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1

1 2 3 4 5 6 7 8

F

E

D

C

B

A