

Capítulo 2 Diseño mecatrónico implementado en el desarrollo de prototipos virtuales y físicos

Chapter 2 Mechatronic design implemented in the development of virtual and physical prototypes

LUGO-GONZÁLEZ, Esther†*, VELARDE-GALVÁN, Alejandra y ARIAS-MONTIEL, Manuel

Universidad Tecnológica de la Mixteca, Instituto de Electrónica y Mecatrónica.

ID 1^{er} Autor: *Esther Lugo-González* / **ORC ID:** 0000-0002-7374-3425, **CVU CONACyT ID:** 47822

ID 1^{er} Coautor: *Alejandra Velarde-Galván* / **ORC ID:** 0000-0002-7302-5669, **CVU CONACyT ID:** 1061037

ID 2^{do} Coautor: *Manuel Arias-Montiel* / **ORC ID:** 0000-0003-4534-9401, **CVU CONACyT ID:** 43904

DOI: 10.35429/H.2020.5.22.39

E. Lugo, A. Velarde, M. Arias

elugog@mixteco.utm.mx

A. Marroquín, J. Olivares, L. Cruz y A. Bautista. (Coord) Ingeniería. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Querétaro, 2020.

Resumen

En el desarrollo de sistemas mecatrónicos y robóticos, se ha trabajado en el diseño y construcción de prototipos, y algunas de las necesidades que surgen son la disminución de los tiempos de diseño, de manufactura, costos, precisión y exactitud en movimientos o trayectorias entre otras variables. Para resolver esto, se plantean diversas metodologías, que tienen como objetivo utilizar las bases del método científico y la ingeniería concurrente para generar sistemas mecatrónicos optimizando recursos. En este trabajo, se presenta la implementación de algunas metodologías de diseño mecatrónico en el desarrollo de prototipos virtuales y físicos funcionales con aplicaciones reales y específicas como en la robótica de rehabilitación, robótica móvil y manipuladores y máquinas varias. Se presenta la descripción de 6 prototipos en los que se muestran los resultados de aplicar una metodología de diseño mecatrónico y llevar una evaluación de las actividades desde que se genera la idea hasta que se tiene un prototipo terminado.

Diseño mecatrónico, metodologías de diseño, prototipos, simulación

Abstract

In the development of mechatronic and robotic systems, work has been done on the design and construction of prototypes, and some of the needs that arise are the reduction of design times, manufacturing, costs, accuracy and precision in movements or trajectories, among others variables. To solve this, various methodologies are proposed, which aim to use the foundations of the scientific method and concurrent engineering to generate mechatronic systems optimizing resources. In this work, we present the implementation of some mechatronic design methodologies in the development of virtual and physical functional prototypes with real and specific applications such as rehabilitation robotics, mobile robotics, and various manipulators and machines. The description of 6 prototypes showing the results of applying a mechatronic design methodology and assessing the activities from the time the idea is generated until a finished prototype is available.

Mechanical design, design methodology, prototype, simulation

2. Introducción

El desarrollo de sistemas mecatrónicos y robóticos se basa en la investigación, el diseño, construcción e implementación de la integración mecánica, eléctrica, electrónica o de control, con el objetivo de ahorrar energía y optimizar costos, manipular procesos y sistemas, e incrementar la calidad para obtener un producto final. Para tal fin se han desarrollado herramientas que resuelven cada una de las etapas, iniciando por la investigación y el diseño mecatrónico. En (Pacheco Vélez, 2020) se menciona que la investigación aplicada busca el uso de los conocimientos adquiridos para sistematizar e implementar la práctica y a partir de esta adquirir unos nuevos, por eso, se han diseñado metodologías que consideran varias etapas para llegar a un producto mecatrónico terminado. (Vargas, 2005) muestra la organización de actividades asociadas a la realización de proyectos bajo un enfoque de integración de tecnologías, así como los requerimientos y resultados más significativos de sistemas mecatrónicos generados para diversas aplicaciones. En (Galvis, 2020) se hace referencia a la metodología ciclo Deming PHVA (planear, verificar, hacer, actuar), que resume las actividades que deben realizarse en el desarrollo de un proyecto y junto con el método científico, además de que se especifica si la investigación es experimental o no, lo cual permite delimitar los alcances del proyecto.

Por otro lado en (Tomiya et al., 2009) se describen metodologías que hasta 2009 se han utilizado en la industria y en instituciones educativas, mostrando que las más útiles en la práctica son las basadas en métodos matemáticos, las que se utilizan para lograr objetivos concretos y las metodologías de proceso. Con base en las metodologías para lograr objetivos concretos, en este capítulo se presentan 12 actividades específicas para desarrollar un prototipo de esta área, indicando las herramientas que se pueden utilizar para cumplir con las metas que deben plantearse en cada fase, con el objetivo de ser más didácticas y accesibles para los alumnos, también se espera que puedan definir un plan de trabajo incluyendo todas las fases del diseño de una forma autónoma y realizando las correcciones u optimización de las tareas que sea necesario.

Para esto, se presenta en la sección 2 una revisión del estado del arte de autores que han desarrollado metodologías en el diseño mecatrónico y de quienes se han tomado puntos importantes para plantear actividades generales para diseño y construcción de un prototipo, en la sección 3 se presenta una descripción del prototipo virtual, así como de los puntos que permiten transformar los resultados simulados de este a un prototipo físico. En la sección 4 se indican las 12 actividades básicas para lograr el diseño y construcción de un prototipo. En la sección 5 se presentan los casos de aplicación, que básicamente se dividen en 3 temas identificados como robótica de rehabilitación, robots móviles y manipuladores y máquinas varias. Por último, en la sección 6 se presenta un análisis indicando los resultados de aplicar esta serie de actividades a 36 prototipos escolares a nivel ingeniería de la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

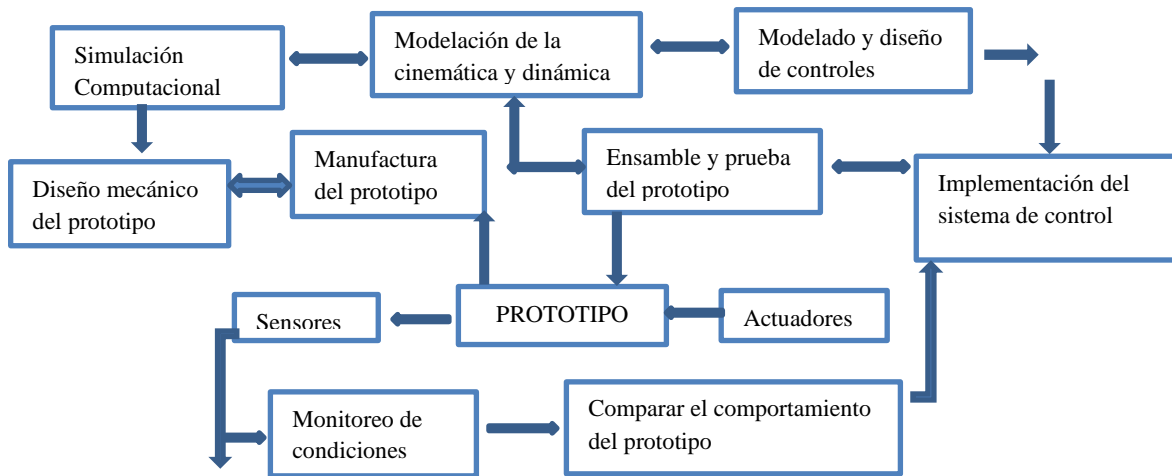
2.1 Antecedentes

La metodología de (Ullman, 1994) fue escrita para diseño mecánico, pero resalta las primeras fases del diseño de producto, iniciando por la detección de la problemática, el diseño conceptual, el desarrollo del producto y el soporte del mismo; esta sirvió de fundamento para las metodologías del diseño mecatrónico que se enlistan a continuación. De las primeras metodologías específicas para sistemas mecatrónicos, está la expuesta por (Cross, 2005), quien resalta el uso del diseño aplicado en ingeniería y en productos en general, se basa principalmente en el diseño conceptual y físico, además presenta los 35 Métodos del diseño de Jones. Posteriormente (Pahl, G. et al, 2006), agregan al diseño conceptual, también la construcción, el diseño para la calidad y para tener el mínimo de costos. (Tomiyama et al., 2009), como se muestra en la Tabla 2.1, hace un análisis y exposición de las metodologías que se han utilizado en el diseño mecatrónico, dividiéndolas en abstractas y concretas, indicando que las metodologías de objetivos concretos y tecnologías de procesos son la más utilizadas, así como los métodos matemáticos y los de dibujos. Otro autor importante en esta área es (Ulrich & Eppinger, 2013) con su libro “Diseño y desarrollo de productos”, uno de los más utilizados para impartir asignaturas que involucren diseño en ingeniería. (Gorrostieta et al., 2015) presentan una síntesis de la metodología que resume las actividades más utilizadas por varios autores para realizar el diseño y la construcción de un prototipo, como se muestra en la Figura 2.1, en su trabajo expone los resultados de implementar sus metodologías durante 15 años en universidades públicas y privadas. Algunos ejemplos de aplicación son expuestos por (Acevedo et al., 2017) y (Blanco Ortega et al., 2018) cuyos trabajos tienen en común el uso de la ingeniería concurrente como se explica en (Macas, 2017) y tiene como objetivo el diseño y desarrollo simultáneo de productos y procesos.

Tabla 2.1 Metodologías abstractas y concretas para diseño mecatrónico

| | General | Individual |
|------------------|---|---|
| Abstracto | Teoría del diseño (GDT, UDT) | Métodos basados en matemáticas (optimización, diseño axiomático, método Taguchi). Programas computacionales |
| Concreto | Metodologías del diseño (Diseño adaptable, Modelo características-Propiedades de Weber, Modelo contacto y cambio de Albers, Síntesis emergente, Hansen, Hubka & Eder, Desarrollo de productos integrados de Andreasen, Koller, Muller, Pahl y Beitz, Roth, Ullman, Ulrich y Eppinger). Metodología para lograr metas concretas (Diseño axiomático, diseño para X, metodología para toma de decisiones, DSM, FMA, Diseño total de Pugh, TRIZ, QFD (Quality Function Deployment-despliegue de la Función de Calidad)). Metodologías de procesos (Ingeniería concurrente, DSM) | Métodos de diseño |

Fuente de Consulta: (Tomiyama et al., 2009)

Figura 2.1 Diseño mecatrónico

Fuente de Consulta: (Gorrostieta et al., 2015)

2.2 Implementación de las metodologías de diseño

El diseño mecatrónico se puede simplificar en tres fases: modelado, simulación, prototipado y construcción (Shetty & Kolk, 2011). El modelado puede plantearse con ecuaciones básicas o en física detallada. Las simulaciones permiten determinar el comportamiento de las variables, las constantes, las entradas y las salidas del sistema (Pérez-Rodríguez et al., 2018), además de tener una mejor comprensión del comportamiento dinámico y las interacciones de los componentes (Shetty D. et al., 2012). El prototipado y la construcción, permiten desarrollar máquinas, en donde los sistemas mecánicos, electrónicos y computacionales convergen.

El prototipado permite hacer ajustes o rediseños para cumplir con los requerimientos del cliente y la construcción, permite obtener el producto final, teniendo que validarse con base en pruebas y los requerimientos solicitados. El prototipado virtual es la integración de diseño asistido por computadora, programación de software embebido y software de simulación para visualizar, en este caso, un dispositivo mecatrónico inteligente en una computadora (McHugh & Zhang, 2008).

En las fases del desarrollo de prototipos, tales como diseño conceptual, preliminar o detallado, el uso de prototipos virtuales permite realizar una revisión constante de los avances del proyecto y del cumplimiento de los requerimientos. Las fase de creación de los prototipos virtuales y físicos, según la investigación de (Ulrich & Eppinger, 2013) y (Kim, 2019) son:

- Representación del modelo digital.
- Nivel de generación
- Nivel de operación (Fabricación digital)
- Nivel de interacción utilizando por ejemplo realidad virtual o realidad aumentada.
- Representación física del modelo
- Manufactura
- Ensamble
- Operación

Respecto a la parte de construcción del prototipo físico, es importante tener previamente el diseño para la manufactura así como para el proceso de ensamble (Bayoumi, 2000) y el Análisis Modal de Fallas y Efectos (AMFE), (Stamatis, 2003). Respecto a las pruebas de operación, estas deben ser definidas con los requerimientos de usuario, ya que deben cumplir con movimientos, trayectorias, secuencias o actividades específicas y deben funcionar mecánicamente y con la implementación de algún sistema de control, ya sea de lazo abierto o con retroalimentación de información, para así cumplir con los elementos de un diseño mecatrónico.

Por las características de los prototipos presentados en este trabajo, se utilizan las metodologías para lograr objetivos concretos y con base en los trabajos expuestos por (Tomiyama et al., 2009), (Gorrostieta et al., 2015), (Acevedo Londoño et al., 2017) y (Blanco Ortega et al., 2018), se generaron una serie de actividades para obtener prototipos físicos pasando previamente por los virtuales para verificar y validar la funcionalidad de los sistemas.

1. *Identificar el problema o la necesidad y definir las especificaciones de ingeniería que debe tener el producto:* Se emplean las metodologías para obtener metas concretas (Tomiyama et al., 2009). En esta fase también se hace la investigación de antecedentes, alcances, definición de restricciones y limitantes, además de la programación de actividades, utilizando cronogramas de tiempo (herramienta Gantt), para programar todas las actividades.
2. *Generación de conceptos:* Se realizan dibujos a mano alzada y lluvia de ideas. Posteriormente se plantean modelos matemáticos o diagramas a bloques para obtener una función que muestre el comportamiento del sistema siendo una representación del sistema mecánico, electrónico o de control y de su interacción con el entorno.
3. *Diseño preliminar:* Algunos programas que se utilizan para presentar el concepto de diseño preliminar son: diseño asistido por computadora (Computer Aided Design), CATIA (computer-aided three-dimensional interactive application), Pro/ENGINEER –PTC, SOLIDWORKS®, AutoCAD®, entre otros (Blanco et al., 2019).
4. *Simulaciones con el uso de un prototipo virtual:* Para validar el modelo matemático, así como para comprobar que el prototipo virtual mecánico cumple con los requerimientos establecidos. Se pueden utilizar herramientas computacionales como ingeniería asistida por computadora (MSC ADAMS®, ANSYS®, ALTAIR®, COMSOL®, DYMOLA®, MODELICA®, NASTRAN®, LMS Virtual.Lab, SimMechanics o Universal Mechanism) y manufactura asistida por computadora (Mastercam, CAMWorks, BobCAM o Edgcam) (Blanco et al., 2019).
5. *Determinar los componentes mecánicos y electromecánicos:* En esta fase se determinan los componentes necesarios para construir el prototipo, así como la selección del material de construcción. Toda la selección de componentes y de materiales se hace a través de cálculos, programas de simulación y catálogos de proveedores. Como se menciona, solo son prototipos y no se utilizan materiales para un uso industrial o aplicación práctica, en la mayoría de los casos se utiliza la impresión 3D (ABS y PLA), acrílico, aluminio, madera, Nylamid, fibra de carbono o fibra de vidrio.
6. *Determinar los componentes electrónicos:* De los elementos importantes en los prototipos se encuentran las tarjetas de control, ya que son “el cerebro” del sistema. Algunas tarjetas muy utilizadas entre los estudiantes son Arduino (con todas sus variantes), Raspberry, PIC’s o ATMega por mencionar algunas. También deben seleccionarse los sensores, procesadores, transductores e interfaces de comunicación que permitirán tener un sistema semiautomático o automático.
7. *Realizar la construcción del prototipo:* En esta parte se realiza la construcción del prototipo considerando el maquinado, la impresión 3D o las actividades que se hicieron previamente en el diseño para manufactura y ensamble.
8. *Programación del sistema de control:* Las técnicas involucradas para generar la autonomía, en el sistema pueden ser: Lógica difusa, redes neuronales y algoritmos genéticos (técnicas conocidas como inteligencia computacional). Asimismo, la teoría de sistemas no lineales y caos, procesamiento de imágenes, robótica, micro y nanotecnología, dispositivos mecatrónicos e ingeniería de software.

9. *Determinar el nivel de contacto entre usuario y robot:* En varios casos se requiere de una interfaz hombre-máquina, esta puede hacerse con programas computacionales como LabVIEW™, Visual C++, Java, Python o MATLAB® o también utilizando pantallas electrónicas, controles físicos y botones.
10. *Evaluación entre lo simulado y lo calculado:* Se debe hacer una comparación entre los cálculos y el sistema simulado para garantizar que se han utilizado los parámetros adecuados, así como para hacer la optimización y/o modificaciones que se requieran. Esta fase puede realizarse en cualquier etapa del diseño y para cualquiera de las áreas involucradas ya sea la mecánica, eléctrica, electrónica o de control.
11. *Validar la funcionalidad del sistema o máquina:* En este caso se hace uso de las simulaciones también para validar el comportamiento del prototipo. Se valida el diseño y funcionalidad entre el prototipo virtual y el físico, evaluando las estrategias de control, los movimientos que debe realizar o el cumplimiento de los requerimientos.
12. *Reportar resultados:* Generalmente se presenta una memoria técnica, manual de funcionamiento y manual de mantenimiento.

2.3 Diseño y construcción de prototipos mecatrónicos

La metodología de diseño mecatrónico se implementó para el desarrollo y evaluación en las asignaturas Proyecto Integrador y Seminario de Investigación que se cursa en el 9° semestre de la Ingeniería en Mecatrónica en la Universidad Tecnológica de la Mixteca. Se realizaron 36 prototipos, los cuales tuvieron como requerimientos obligatorios generar un prototipo físico que involucrara un sistema mecánico, electrónico, de control e interfaz hombre-máquina, así como el prototipo virtual. Para la evaluación escolar, se solicitó un trabajo escrito que incluía un cronograma de actividades, la memoria de cálculos y los planos de diseño, un poster que se utilizó en una exposición local, un manual de funcionamiento y un manual de mantenimiento. Se trabajó con tres categorías propuestas por los estudiantes: robots de rehabilitación, robots móviles y manipuladores y máquinas varias. Para efectos demostrativos, en este capítulo se presentan 6 proyectos, donde en el primer caso de estudio se desarrollan cada uno de los 12 puntos antes referidos y para simplificar la presentación del resto de los proyectos, se muestra la definición del problema indicando la problemática, el objetivo general, la descripción del diseño y la presentación de resultados.

2.4 Robótica de rehabilitación

Los rehabilitadores mecatrónicos, son dispositivos que buscan mejorar la recuperación de un paciente después de haber sufrido algún tipo de enfermedad o lesión en alguna parte de su cuerpo. Un dispositivo mecatrónico aplicado a la rehabilitación, básicamente se enfoca en servir como apoyo al fisioterapeuta en el proceso de recuperación del paciente (Guzmán Valdivia et al., 2013). Para desarrollar sistemas de rehabilitación robótica, se requiere considerar la adaptabilidad al usuario final, el consumo energético y la aceptabilidad de la tecnología por terapeutas e instituciones especializadas en rehabilitación (Acevedo Londoño et al., 2017). Con base en este tema se presentan dos prototipos: rehabilitador de rodilla y rehabilitador de hombro.

2.5 Rehabilitador de rodilla

Se requiere el diseño de un robot de rehabilitación de rodilla postoperatorio de movimiento continuo-pasivo. La fase inicial del proyecto fue expuesta por el estudiante (Sosa-Lopez et al., 2017). Para obtener los requisitos de diseño y definir la problemática, se realizaron encuestas a los usuarios potenciales y a expertos en el tema, posteriormente esta información se completó utilizando una revisión de estado del arte. Así mismo, se utilizaron las metodologías del QFD (Figura 1.2) y PDS para obtener los requerimientos necesarios e importantes del sistema. El objetivo general es presentar una herramienta funcional a nivel mecánico-eléctrico-informático y de control para dar una alternativa tanto para los médicos, como para los pacientes de manera tal, que el diagnóstico y la rehabilitación sean justificadas por gráficas obtenidas de los esfuerzos ejercidos por el prototipo en funcionamiento. Con base en el resultado de las herramientas QFD (Despliegue de Funciones de Calidad) y PDS (Especificaciones del diseño de Producto), se definieron 10 requisitos como base del diseño del prototipo.

La primera fase consistió en hacer el diseño del prototipo en un programa CAD y posteriormente simularlo para verificar el cumplimiento de la fase mecánica.

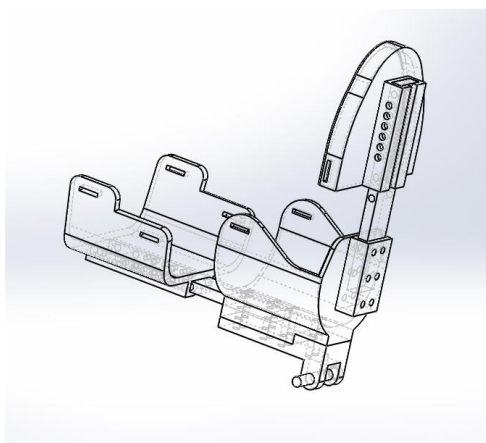
En la Figura 2.3 se muestran a) el diseño preliminar de una parte del rehabilitador realizado en un programa CAD con el cual se validó el cálculo del par de los motores seleccionados y b) la primera simulación para verificar que se cumpla con los movimientos necesarios implementando un sistema de control, primero de lazo abierto y luego un sistema PID (Proporcional-integral-derivativo), este se simuló en el programa ADAMSView™. Con el análisis de materiales, se determinó que se requiere Acero AISI1020 y Nylamid para la construcción, aunque también se necesita imprimir piezas en 3D en material PLA y adquirir elementos mecánicos como rodamientos, tornillos y tuercas. El proceso de manufactura de la parte mecánica para el rehabilitador de rodilla consistió en maquinar los bloques, soldar los elementos de la mesa de soporte y dar las medidas a los ejes del prototipo. Las máquinas básicas para manufactura fueron el torno fresador y la impresora 3D. La mayoría de los componentes se seleccionaron para ser de medidas y valores estándar, con el objetivo de ser adquiridos fácilmente en tiendas comerciales.

Figura 2.2 Casa de la calidad o QFD para el rehabilitador de rodilla

| Requerimientos de Calidad | | Diseño e implementación del sistema de control de un robot de rehabilitación y diagnóstico de rodilla postoperatorio de movimiento continuo pasivo. | | | | | | | | | | |
|---------------------------|----------------------|---|----------|-------------|-------------|-------------|--------------------|-----------------|---------------|-----------------|----------------------------|-------------|
| | | Obligatorio | Deseable | Importancia | No. motores | Máximo peso | Distintas terapias | Fuerzas externa | Mantenimiento | Actividades ext | Factores físicos químicos. | Velocidades |
| Desempeño funcional | Etapa de control | Motores de alta calidad. | | X | 4 | * | * | * | * | | | * |
| | | Un solo motor por articulación. | | X | 3 | * | * | * | * | | | * |
| | | Eficiencia en la tarjeta de control de motores | X | | 4 | * | | * | | | | * |
| | | Programación de más de 4 secuencias distintas | | X | 2 | * | | * | * | | | * |
| | | Movimientos suaves | X | | 5 | * | | * | * | | * | * |
| | | Estiramiento completo de la estructura | | X | 3 | * | * | * | * | * | | * |
| | Etapa de diagnóstico | Diagnóstico por base de datos | | X | 2 | | | * | | * | | |
| | | Interfaz amigable con el usuario | X | | 5 | | | | | * | | |
| | | Identificación de pacientes | | X | 3 | | | | | * | | |
| | | Generación de reportes | | X | 3 | * | | | | * | | |
| | | Apariencia agradable | X | | 3 | | | | * | * | | |
| | | Comodidad | X | | 5 | | | * | * | | | |

Fuente de Consulta: Elaboración Propia

Figura 2.3 Simulaciones del rehabilitador de rodilla



(a) Diseño preliminar de la bota



(b) Simulaciones de un prototipo virtual

Fuente de Consulta: Elaboración Propia

La selección de los motores y componentes se realizó a partir del cálculo matemático del par de estos, posteriormente se realizó la simulación con Matlab y por último se realizaron pruebas físicas, mostrando que la selección fue óptima para el prototipo.

Respecto a la parte electrónica se requieren 2 motores, una fuente de alimentación y una tarjeta de control (en este caso un Arduino Mega debido a que éste permite la comunicación directa con el software HMI). La comunicación y el diseño de la interfaz se crearon con el Software LabVIEW™, por ser muy gráfico, sencillo de utilizar y de realizar alguna modificación si se requiere. La descripción de la interfaz se hace con base en el modelo comercializado por Cyberx®.

Los programas que se utilizaron para cubrir la programación y simulación del proyecto virtual se muestran en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2 Programas computacionales para uso del prototipo virtual

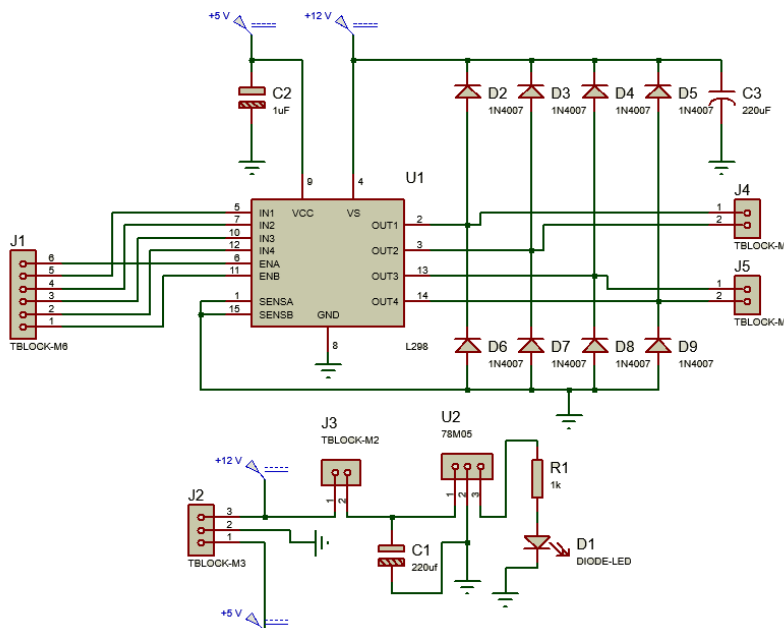
| Programa | Aplicación |
|-------------|--|
| SOLIDWORKS® | Simulación mecánica para obtener el par de los motores, simulación de movimientos, simulación de resistencia de materiales |
| ADAMS View™ | Simulación dinámica del mecanismo |
| MatLab® | Generación de control difuso para los motores |
| LabVIEW™ | Interfaz HMI para que el fisioterapeuta pueda manipular velocidades y posiciones que se requieran para la terapia |
| Proteus | Simulación electrónica de los componentes de potencia y control |

Fuente de Consulta: Elaboración propia

La implementación del control PID en el sistema, proporciona estabilidad en la posición que debe generar el motor. El uso de la tarjeta de control ATmega®, facilitó la programación por las librerías especialmente diseñadas al control de motores. El uso de motores con Driver incluidos, como los encoders (sensores de posición y velocidad), facilita la manipulación de las señales lógicas debido a que solo se debe enviar un pulso para realizar los cambios de giros (Figura 2.4).

El prototipo concluido se muestra en la Figura 2.5 y fue realizado por la alumna Cuevas Vázquez C. N. Se entregó un trabajo escrito que reúne como puntos principales el diseño conceptual, diseño preliminar, y diseño detallado, incluyendo los diagramas eléctricos, electrónicos, dibujos técnicos, manual de funcionamiento y manual de mantenimiento. Los cálculos y detalles más específicos del prototipo se encuentran en (Cuevas-Vázquez et al., 2019).

Figura 2.4 Diagrama electrónico para el control de motores



Fuente de Consulta: Elaboración propia

Figura 2.5 Prototipo físico final



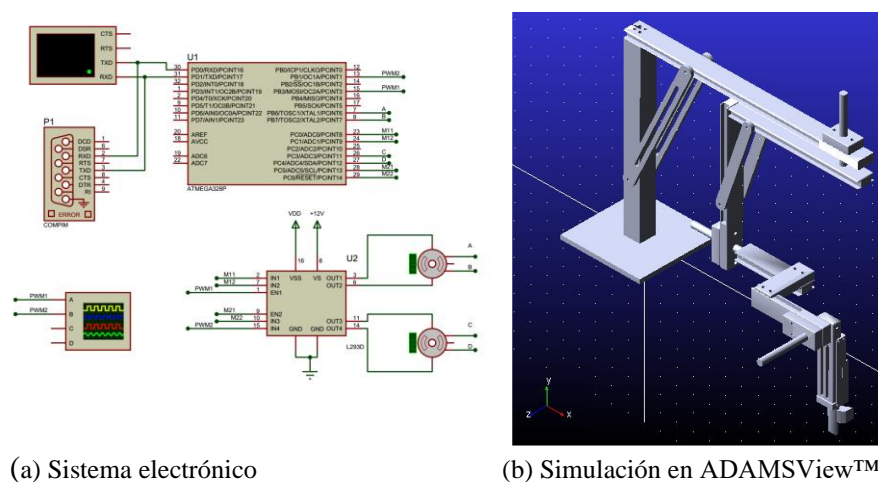
Fuente de Consulta: Elaboración propia

2.6 Rehabilitador de hombro

Propuesta: El diseño principal es derivado de la tesis de maestría de la alumna Deira Sosa Méndez y su artículo (Sosa-Mendez et al., 2017). El trabajo fue retomado por las alumnas Galeote López J. C., Garnica Méndez S. y Ramírez López K., quienes propusieron como metas realizar el rediseño del exoesqueleto rehabilitador de hombro que se tiene en la Universidad Tecnológica de la Mixteca, para quitar material ya que el cliente solicitó que sea más ligero para automatizarlo y fácil de transportar. Ellas proponen hacer un prototipo a escala del exoesqueleto rehabilitador de hombro, para diseñar un sistema de transmisión de potencia mecánica, así como realizar el control de motores para generar los movimientos necesarios e implementar un control de velocidad y posición de los eslabones y al validar sus cálculos y diseño, escalarlo a las dimensiones del prototipo real.

Resultados: Se realizó un análisis de esfuerzos al material original de aluminio para saber cuánto se le puede retirar al prototipo que ya está construido, y también para hacer la selección real de motores y de la transmisión; pero también se hizo el prototipo a escala y se construyó de madera, para hacer pruebas de funcionamiento con la transmisión diseñada. Se implementó un sistema de control PID y se realizó una interfaz en LabVIEW™ para manipular las acciones que debe seguir el prototipo mecánico, simulando los movimientos en una terapia de rehabilitación de brazo. En la Figura 2.6 se muestra a) el sistema electrónico b) la simulación del dispositivo en ADAMSView™ para validar los movimientos aplicando una co-simulación con el programa MATLAB® para implementar el sistema de control. En la Figura 2.7 se presenta el prototipo final físico. Es importante mencionar que actualmente una de las alumnas antes referidas sigue trabajando en el prototipo real en su proyecto de Tesis de licenciatura.

Figura 2.6 Simulación y validación del sistema de control aplicado al prototipo



Fuente de Consulta: Elaboración propia

Figura 2.7 Prototipo final de rehabilitador para hombro



Fuente de Consulta: Elaboración propia

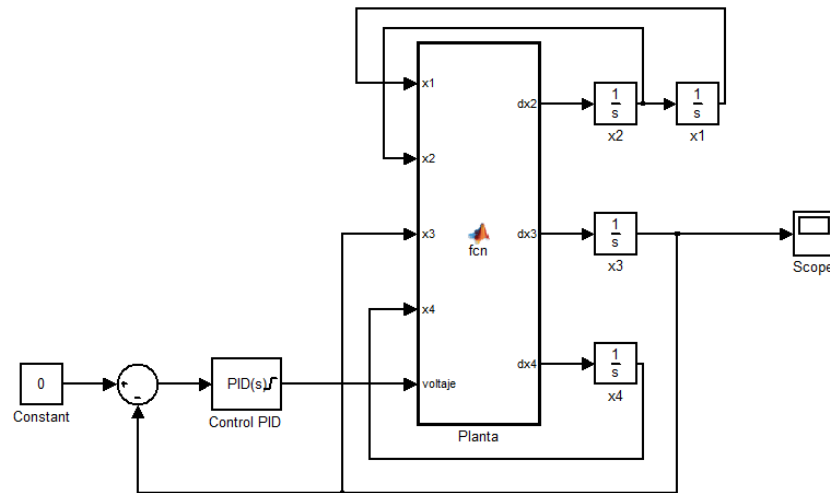
2.7 Robótica Móvil y manipuladores

Un robot móvil es un vehículo de propulsión autónoma y movimiento programado por medio de control automático para realizar una tarea específica y se clasifican en guiados y no guiados. El vehículo guiado está restringido a un conjunto de trayectorias predefinidas en su área de trabajo y los no-guiados pertenecen a los robots submarinos, los del espacio aéreo y/o espacial y los terrestres. Los robots terrestres han sido clasificados por su sistema de movimiento en robot con ruedas, con patas o con rieles (Ponce De León et al., 2014).

2.8 Vehículo péndulo

Problema: Se requiere de un vehículo que pueda transportar objetos de 5kg aproximadamente, para agilizar el traslado de un paquete en lugares en que es difícil desplazarse. Se propone desarrollar un prototipo de base móvil tipo carro péndulo invertido e implementar control para volver estable el sistema durante su desplazamiento. Se requieren los modelos dinámicos y cinemáticos de sistema, así como la simulación de los controladores y la planta. Como característica principal se desea que el sistema sea autónomo.

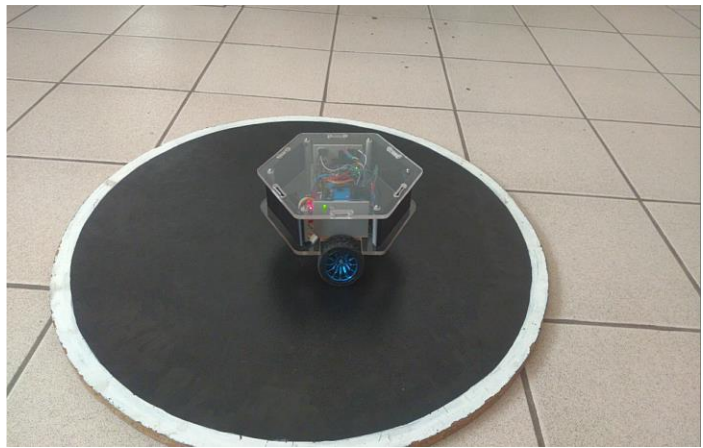
Resultados: El prototipo resultante es una base de forma hexagonal, controlado remotamente a través de una aplicación para celular conectada vía Bluetooth, para realizar desplazamientos hacia adelante, atrás, giros horarios y antihorarios. Básicamente, la planta es el típico sistema carro péndulo invertido, donde, el hexágono que se desplaza es el carro y la carga funge como péndulo; ya que el sistema solo cuenta con neumáticos laterales para su movimiento, la misma carga es utilizada para estabilizar el sistema. Fue desarrollado por los alumnos Antonio Bautista J. A., Martínez Antonio A. y Villalobos Álvarez E. F. En la Figura 1.8 se presenta un ejemplo del sistema de control utilizado, realizado en el programa Simulink de MATLAB. Cabe mencionar que este proyecto también sirvió para ser evaluado en la asignatura de control automático, por lo que llevó un desarrollo muy meticuloso para culminar esta tarea y los alumnos junto con su profesor se encuentran preparando un artículo para congreso y mostrar los resultados que se generaron. En la Figura 1.9 se muestra el prototipo final a) con las pesas para demostrar cuanto peso soporta y b) una base para competencias de minisumo, mostrando otro tipo de terreno en que puede moverse sin presentar problemas de fricción.

Figura 2.8 Sistema de control del vehículo péndulo

Fuente de Consulta: Elaboración propia

Figura 2.9 Presentación del prototipo final vehículo péndulo

(a) Peso soportado por el vehículo 5Kg



(b) Terreno distinto de prueba

Fuente de Consulta: Elaboración propia

2.9 Hexápodo

Problema: Construir el prototipo de un robot para la búsqueda de personas después de un sismo, considerando el uso de un sistema de locomoción hexápoda que permitirá el desplazamiento en terrenos abruptos e irregulares en menor tiempo comparado con otros sistemas de locomoción.

Resultados: Para obtener los requerimientos, los alumnos realizaron una entrevista al grupo “Topos Azteca”, la cual fue transmitida en (Agencia Quadratín, 2018), donde los alumnos Álvarez Nájera I., Colmenares Limeta E. H., Núñez Díaz A. A. y Salinas Vargas I. J., presentaron su diseño conceptual a dicho grupo de rescate y realizaron las recomendaciones que les dieron los rescatistas. Por otro lado, respecto al diseño, se realizaron pruebas de funcionamiento a través del software ADAMSVIEW™, para demostrar que el movimiento del robot es posible, aunque sin cumplir aun la parte de ser reconfigurable como se había sugerido en uno de los requerimientos. El material utilizado para el prototipo mecánico fue impresión en 3D, así como lamina delgada. Se utilizaron 3 motores para manipular cada una de las extremidades, y un sistema de control de lazo abierto para las primeras pruebas, que posteriormente se cambió a un control PID para manipular los motores. Para controlar los movimientos del hexápodo se realizó una interfaz básica junto con una tarjeta Raspberry Pi y el controlador mini-maestro. En la Figura 2.10, se muestra la figura en CAD de una de las extremidades, así como b) una prueba realizada en el programa ADAMSVIEW™. En la figura 2.11 se presenta el prototipo físico.

Figura 2.10 Diseño del robot hexápodo y simulación



(a) Piezas preliminares de una extremidad

(b) Simulación en ADAMSView™

Fuente de Consulta: Elaboración propia

Figura 2.11 Presentación del prototipo final de Hexápodo



Fuente de Consulta: Elaboración propia

2.10 Máquinas diversas

Se realizaron algunas máquinas que surgieron como necesidad de las zonas rurales en las que algunos de los alumnos son originarios. Uno de los objetivos de la materia fue buscar resolver una problemática real, con usuarios con necesidades bien definidas. A continuación, se presentan dos propuestas.

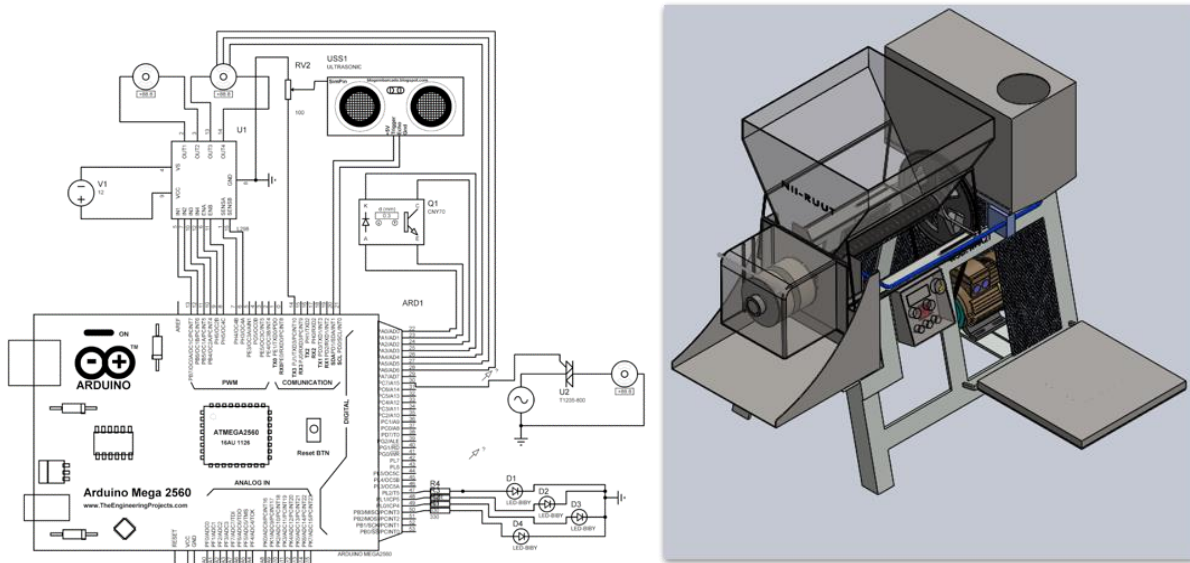
2.11 Máquina moladora de maíz para nixtamal

Problema: Se considera que el principal problema que tienen los operadores de molino de nixtamal es el proceso que se sigue, ya que la deficiencia del propio molino (llenado de la tolva, succión del nixtamal a las muelas, ajuste de la abertura de las muelas, ajuste del flujo de agua y recolección de la masa) obligan al operador a ser parte fundamental de todos estos procesos, ya que se deben maniobrar de forma manual durante el funcionamiento de la máquina, arriesgando y deteriorando las extremidades (dedos, brazos incluso el cabello) y la salud del operador.

El objetivo por lo tanto es desarrollar un molino de nixtamal semiautomático para reducir la interacción física del usuario con la máquina. Esta debe ser para una pequeña producción, fácil de transportar y de utilizar.

Resultados: Se obtuvo una máquina con capacidad de carga de más de 70 kg. La prueba de funcionamiento para el módulo de potencia se hizo conectando el motor AC a la fuente de alimentación de 120 volts, se vio que el motor está sujeto firmemente a la base y que movió sin inconveniente el eje del molino. En este se ajustan automáticamente las muelas, se controla el flujo y nivel de agua, y el usuario solo tiene que presionar el botón de arranque si se habla del proceso manual para iniciar el funcionamiento de la máquina. Los alumnos participantes fueron Hernández Luis R., Mejía Antonio J. L. y Melchor Cruz J. A. En la Figura 2.12 se presenta a) el circuito eléctrico básico del sistema y en b) el diseño en CAD del prototipo final. En la Figura 2.13 se muestra el prototipo físico final del molino de nixtamal.

Figura 2.12 Sistema eléctrico del molino para nixtamal



Fuente de Consulta: Elaboración propia

Figura 2.13 Prototipo físico del molino de nixtamal



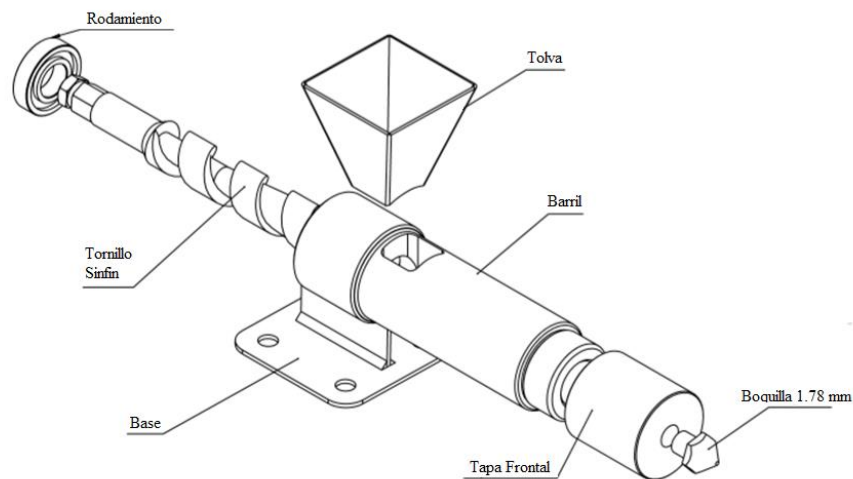
Fuente de Consulta: Elaboración propia

2.12 Máquina extrusora de pet

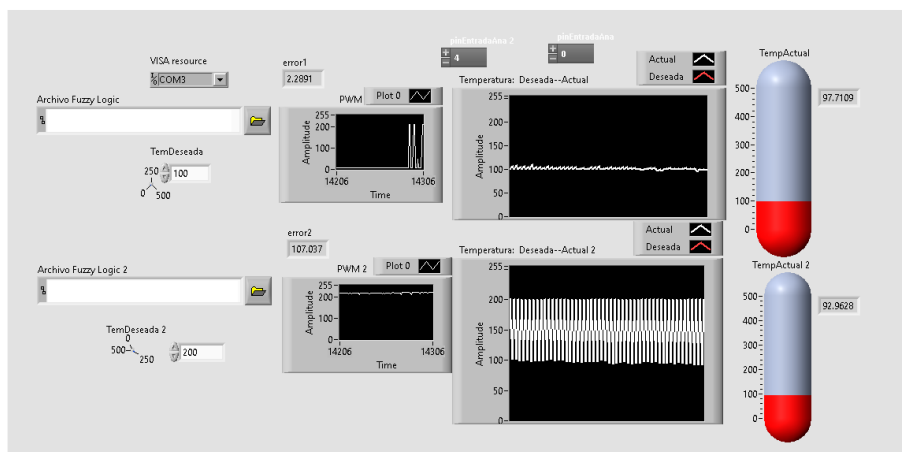
Problema: Transformar los residuos de PET triturado en filamento para impresoras 3D. Se propone un método de calentamiento por inducción para reducir el tiempo de trabajo de la extrusora. Actualmente se utilizan resistencias eléctricas para este propósito.

Resultados: Se obtuvo un prototipo con 10 piezas mecánicas, hechas de aluminio y lámina. Se utilizó como calentador una bobina inductora, un circuito Mazzilli y uno flyback, relevadores y para el sistema de control una tarjeta Arduino. El sistema de control fue realizado por lógica difusa tipo Mamdani. La interfaz se realizó en LabVIEW™. Como resultados de las pruebas que se realizaron se tiene que el tiempo para llegar a la temperatura deseada es de un minuto y cuarenta segundos, mucho menor que el de una extrusora pequeña comercial como Filastruder, la cual tarda 10 minutos. Si se desarrolla un sistema de alimentación eficiente se puede acortar el tiempo de calentamiento muchísimo más, hasta los 30 segundos sin ningún problema, pero el sistema de sensores debe tener una respuesta más rápida para que el control funcione. Los alumnos participantes son Hernández García S., Ochoa Ruiz J. J. y Zárata Jiménez F. G. En la figura 2.14 se muestra a) el dibujo preliminar de la maquina extrusora realizada en un programa CAD y en b) se muestra la interfaz realizada en LabVIEW™. En la figura 2.15 se muestra el prototipo físico final.

Figura 2.14 Diseño preliminar e interfaz del prototipo virtual



(a) Diseño preliminar



(b) Interfaz realizada en LabVIEW™

Fuente de Consulta: Elaboración propia

Figura 2.15 Prototipo físico de extrusora de PET

Fuente de Consulta: Elaboración propia

2.13 Análisis de resultados

Como se mencionó se desarrollaron 36 prototipos, los cuales se dividieron en las siguientes categorías (Tabla 2.3):

Tabla 2.3 Categorías de prototipos

| Categoría | Cantidad |
|--------------------------------|----------|
| Rehabilitación física | 7 |
| Robótica móvil y manipuladores | 16 |
| Máquinas varias | 13 |

Fuente de Consulta: Elaboración propia

Cabe mencionar que estos prototipos se realizaron en dos generaciones, la primera contando con dos grupos, uno de 26 hombres y 6 mujeres, el segundo de 22 hombres y 6 mujeres, en la segunda generación 1 mujer y 31 hombres. En la primera generación fueron 22 prototipos y en la segunda 14, en ambas generaciones los equipos fueron de tres, dos y una persona. De los 36 prototipos presentados, los 22 realizados en la primera generación tuvieron resultados favorables en los prototipos virtuales, realizaron mejores simulaciones y más complejas, pero respecto a la parte física, funcionaron solo un 70% de los prototipos presentados y se cree que fue una mala planeación en la adquisición de componentes y realización de pruebas, ya que por estar ubicados en una comunidad cuya principal actividad es el comercio alimenticio y no el tecnológico, los componentes tienen que pedirse a otros lugares o países con un mayor tiempo de anticipación.

En la segunda generación se obtuvieron 14 prototipos, de los cuales funcionaron en su totalidad con la parte práctica, esto se presupone que fue debido a una mejor planeación de sus proyectos, también se enfatizó sobre hacer una adquisición previa de componentes, y la parte mecánica fue en su mayoría con impresión 3D, ya que en su mayoría fueron proyectos de robots móviles.

Se realizó la siguiente evaluación a cada uno de los prototipos (Tabla 2.4).

Tabla 2.4 Evaluación para cada uno de los prototipos

| Descripción | | Rubrica | | |
|---------------------------------|------------------------------------|--|---|---|
| Dispositivo mecánico | Completo con movimientos físicos | Ensamblado, pero no se mueve todo como debería | Piezas fabricadas y/o ensamble con detalles | Solo piezas sin ensamblar faltan piezas en ensamble |
| Cantidad | 30 | 6 | | |
| Sistema eléctrico | Funcionando en tarjeta PCB | Funcionado en protoboard | Circuito ensamblado | Solo diseño |
| Cantidad | 27 | 5 | 4 | |
| Sistema de control | Implementado (grado de dificultad) | Programado | Diseñado | Diagramas e información básica |
| Cantidad | 15 | 13 | 5 | 3 |
| Interfaz | Implementado | Programado | Diseñado | Diagramas e información básica |
| Cantidad | 27 | 5 | | 4 |
| | Buena presentación | Contenido completo | Básico | Incompleto |
| Manual de funcionamiento | 31 | | 5 | |
| Manual de mantenimiento | 36 | | | |
| Trabajo escrito | Completo | Falta último capítulo | Capítulos incompletos | Desordenado |
| Cantidad | 26 | 3 | 4 | 3 |
| Poster | 36 | | | |

Fuente de Consulta: Elaboración propia

2.14 Conclusiones

Como se observó en los resultados, es posible obtener prototipos funcionales en un periodo escolar de 6 meses si se sigue una metodología con objetivos concretos. Esta serie de actividades se implementó con alumnos de licenciatura y se está trabajando con alumnos de posgrado, quienes deben obtener mejores resultados al dedicarse en mayor tiempo a la investigación y construcción de sus prototipos. Varios de los proyectos pueden mejorarse e incluso comercializarse o patentarse cambiando en algunos casos los materiales utilizados, ya que como se mencionó son prototipos escolares y el presupuesto es reducido en comparación de uno industrial. En el trabajo escrito también se hizo un análisis de costos, para que los alumnos verificaran que un prototipo no siempre es más accesible que uno ya existente y con eso demostrar que se debe diseñar pensando en hacer un producto funcional y no solo un dispositivo para vender.

2.15 Referencias

Acevedo Londoño, A. J., Caicedo Bravo, E., & Castillo García, J. F. (2017). Aplicación de tecnologías de rehabilitación robótica en niños con lesión del miembro superior. *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud. Redalyc.* 49(1), 103-114.

Agencia Quadratín. (2018, May 7). Desarrollan robot para el rescate de vidas. *Diario Marca La Historia de Oaxca*. Retrieved from <http://www.diariomarca.com.mx/2018/05/estudiantes-oaxaqueños-construyen-robot-para-el-rescate-de-vidas/>

Bayoumi, A. M. E. (2000). Design for manufacture and assembly (DFMA): concepts benefits and applications, current advances in mechanical design and production, 7th Cairo University International MDP Conference. Elsevier, 7, 501–509.

Blanco, A., Antúnez, E., Magadán, A., Santana, J. A., Alcocer, W. M., & Abúndez, A. (2019). Tema A5 Educación en Ingeniería Mecánica : Mecánica computacional “ Análisis y simulación dinámica de dos prototipos virtuales : sistema de elevador y robot paralelo .” *Memorias Del XXV Congreso Internacional Anual de La SOMIM*, 1–7.

- Blanco Ortega, A., Magadán Salazar, A., Gómez Becerra, F. A., Guzmán Valdivia, C. H., & Antúnez Leyva, E. (2018). Diseño de sistemas mecatrónicos: prototipos virtuales. *Pistas Educativas*, 40(January 2019), 1421–1439.
- Cross, N. (2005). *Métodos de Diseño: estrategias para el diseño de productos*. Limusa Wiley, 1-98.
- Cuevas-Vázquez, C. N., Lugo-González, E., Arias-Montiel, M., & Sosa-López, E. D. (2019). Desarrollo de un prototipo para rehabilitación de rodilla utilizando un robot paralelo 5R de 2 GDL. *XXI Congreso Mexicano de Robótica*, 306–311.
- Galvis, J. B. M. (2020). Desarrollo del sistema de control para el compresor Campbell Hausfeld de 40 HP del Sena-Astin. Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de ingeniería. Tesis de Ingeniería, 1-127.
- Gorrostieta, E., Rodríguez Resendiz, J., Vargas Soto, E., Zuñiga Aviles, L. A., & Tovar Arriaga, S. (2015). Mechatronics methodology: 15 years of experience *Metodología mecatrónica: 15 años de experiencia*. *Ingeniería e Investigación*, 35(3), 107–114.
- Guzmán Valdivia, C. H., Blanco Ortega, A., & Oliver Salazar., M. A. (2013). Entendiendo la Mecatrónica en la Rehabilitación. *CIINDET 2013 X Congreso Internacional Sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico*. Cuernavaca Morelos, México, 688-693.
- Kim, D. Y. (2019). A design methodology using prototyping based on the digital-physical models in the architectural design process. *Sustainability (Switzerland)*, 11(16), 1-23.
- Macas, E. M. (2017). Definición y Estado del Arte de la Ingeniería Concurrente La Manufactura Integrada por Computador y la Mecatrónica. *INNOVA Research Journal*, 2(10), 44–60.
- McHugh, R., & Zhang, H. (2008). Virtual Prototyping of Mechatronics for 21 st Century Engineering and Technology. *Proceedings of the 2008 ASEE Midwest Conference.*, 1-12.
- Pacheco Vélez, L. Y. (2020). Diseño de un equipo graduable para rehabilitación de mano post infarto cerebral mediante el uso de microcontroladores PIC. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Tesis de Ingeniería, 1-73.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & K.-H. Grote. (2006). Engineering design a Systematic Approach. In *Constructing the Future: nD Modelling*, 1(3), 14-39. <https://doi.org/10.4324/9780203967461>
- Pérez-Rodríguez, R., Molina, A., Miranda, J., Borja, V., & Wright, P. (2018). The requirements specification of mechatronic products based-on the Integrated product, process and manufacturing development model. *Ingeniería Mecánica*, 21(3), 145–152.
- Ponce De León, N. I., Aguilar López, C., Cruz Domínguez, G. V., & López Arauz, F. (2014). Instrumentación de un Robot Móvil para la Detección de Objetos. *SOMI XXIX Congreso de Instrumentación*, 1–9.
- Shetty, D., & Kolk, R. A. (2011). *Mechatronics system design (2nd ed.)*. ed. DELMAR. USA: Cenague Learning, 2(1), 1-504.
- Shetty, D., Manzione, L., & Ali, A. (2012). *Survey of Mechatronic Techniques in Modern Machine Design*. 2012, 1-9.
- Sosa-Lopez, E. D., Arias-Montiel, M., & Lugo-Gonzalez, E. (2017). A numerical approach for the inverse and forward kinematic analysis of 5R parallel manipulator. *2017 14th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, CCE 2017*, 1–6.
- Sosa-Mendez, D., Arias-Montiel, M., & Lugo-González, E. (2017). Diseño de un prototipo de exoesqueleto para rehabilitación del hombro. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*. 38(1), 322–335.
- Stamatis, D. H. (2003). Failure Mode and Effect Analysis. *William A. tony*, 2(1), 5-13.

- Tomiyama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, C., & Kimura, F. (2009). Design methodologies: Industrial and educational applications. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2), 543–565.
- Ullman, D. G. (1994). The mechanical design process. In *Mechanical Engineering Science*. New York: Mc. Graw Hills, 4(15), 1-450.
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. Mac Graw-Hill, 5(1), 1-434.
- Vargas, J. (2005). Metodología en Proyectos Mecatrónicos Industriales. *Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial*, 1, 1–7.