



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y**  
**TECNOLOGÍAS AVANZADAS**

**TRABAJO TERMINAL II**

**Herramienta didáctica modular para la práctica de la  
asignatura análisis y síntesis de mecanismos**

*Qué para obtener el título de*

**“Ingeniero en Mecatrónica”**

*Alumnos*

**López Galván Karina Dennis**

**Morales Reyes Oscar Gerardo**

**Verona Coronel Eduardo**

*Asesores*

**Dr. Ángel Pretelín Ricárdez**

**M. en C. Carlos Daniel Rico Mandujano**

**M. en C. Flabio Dario Mirelez Delgado**

Presidente del jurado: M. en C. Juan Carlos Guzmán Salgado

Profesor titular: Ing. Heredia Vargas Omar



México, D.F.

Diciembre, 2021



## Autorización de uso de obra

**Instituto Politécnico Nacional**

**P r e s e n t e**

Bajo protesta de decir verdad el que suscribe López Galván Karina Dennis  
(se anexa copia simple de identificación oficial), manifiesto ser autor (a) y titular de los  
derechos morales y patrimoniales de la obra titulada Herramienta didáctica  
modular para la práctica de la asignatura análisis y síntesis de mecanismos

\_\_\_\_\_, en adelante “La Tesis” y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio  
del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal  
del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante El IPN,  
autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente  
en medios digitales, Plataforma de la Dirección de Bibliotecas del IPN y/o consulta  
directa en la Coordinación de Biblioteca de la UPIITA “La Tesis” por un periodo de 5  
años contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará  
automáticamente en caso de no dar aviso expreso a “El IPN” de su terminación.

En virtud de lo anterior, “El IPN” deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de  
“La Tesis”. Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y  
patrimoniales de “La Tesis”, manifiesto que la misma es original y que la presente  
autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de “La Tesis”, por lo  
que deslindo de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de “La Tesis” o  
la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos  
industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de  
propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de  
cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México, a 24 de diciembre de 2021

**Atentamente**

  
\_\_\_\_\_



**Autorización de uso de obra**

**Instituto Politécnico Nacional**

**Presente**

Bajo protesta de decir verdad el que suscribe Oscar Gerardo Morales Reyes  
(se anexa copia simple de identificación oficial), manifiesto ser autor (a) y titular de los  
derechos morales y patrimoniales de la obra titulada Herramienta didáctica modular  
para la práctica de la asignatura de análisis y síntesis de mecanismos.

en adelante "La Tesis" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y  
con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de  
Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante El IPN, autorización no  
exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales,  
Plataforma de la Dirección de Bibliotecas del IPN y/o consulta directa en la Coordinación  
de Biblioteca de la UPIITA "La Tesis" por un periodo de 5 años contado a partir de la fecha  
de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no  
dar aviso expreso a "El IPN" de su terminación.

En virtud de lo anterior, "El IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor  
de "La Tesis".

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales  
de "La Tesis", manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no  
contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "La Tesis", por lo que deslindo  
de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de "La Tesis" o la  
autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos  
industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de  
propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de  
cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México, a 24 de diciembre de 2021

**Atentamente**



**Autorización de uso de obra**

**Instituto Politécnico Nacional**

**Presente**

Bajo protesta de decir verdad el que suscribe Eduardo Verona Coronel  
(se anexa copia simple de identificación oficial), manifiesto ser autor (a) y titular de los  
derechos morales y patrimoniales de la obra titulada Herramienta  
didáctica modular para la práctica de la asignatura de  
análisis y síntesis de mecanismos

\_\_\_\_\_, en adelante "La Tesis" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio  
del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal  
del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante El IPN,  
autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente  
en medios digitales, Plataforma de la Dirección de Bibliotecas del IPN y/o consulta  
directa en la Coordinación de Biblioteca de la UPIITA "La Tesis" por un periodo de 5  
años contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará  
automáticamente en caso de no dar aviso expreso a "El IPN" de su terminación.

En virtud de lo anterior, "El IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de  
"La Tesis". Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y  
patrimoniales de "La Tesis", manifiesto que la misma es original y que la presente  
autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "La Tesis", por lo  
que deslindo de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de "La Tesis" o  
la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos  
industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de  
propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de  
cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México, a 24 de diciembre de 2021

**Atentamente**

Eduardo Verona Coronel





# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERÍA Y  
TECNOLOGIAS AVANZADAS

## TRABAJO TERMINAL II

**“Herramienta didáctica modular para la práctica  
de la asignatura análisis y síntesis de  
mecanismos”**

*Qué para obtener el título de  
“Ingeniero en Mecatrónica”*

*Presentan los alumnos*

**López Galván Karina Dennis**

**Morales Reyes Oscar Gerardo**

**Verón Coronel Eduardo**

*Asesores*

**Dr. Ángel Pretelín Ricárdez**

**M. en C. Carlos Daniel Rico Mandujano**

**M. en C. Flabio Darío Mirelez Delgado.**



*Presidente del Jurado*

**M. en C. Juan Carlos Guzmán Salgado**

*Profesor Titular*

**Ing. Heredia Vargas Omar**



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

## Índice

1.	Introducción.....	12
2.	Planteamiento del problema .....	13
3.	Justificación .....	14
3.1	Social 14	
3.2	Técnica.....	15
3.	Objetivos.....	17
4.1	Objetivo general .....	17
4.2	Objetivos específicos .....	17
4.2.1	Objetivos específicos de Trabajo Terminal I.....	17
4.2.2	Objetivos específicos de Trabajo Terminal II.....	17
4.	Estado del arte y Estado de la técnica.....	18
5.	Antecedentes.....	22
6.	Marco teórico .....	23
6.1	Mecánica.....	23
6.2	Mecanismo.....	24
6.3	Ley de Grashof .....	25
6.4	Mecanismo cuatro barras .....	25
6.4.1	Mecanismo manivela-manivela .....	25
6.4.2	Mecanismo manivela-manivela .....	26
6.4.3	Mecanismo balancín-balancín.....	26
6.5	Mecanismo Biela-manivela- corredera .....	26
6.6	Mecanismo Biela-manivela- corredera descentrada.....	27
6.7	Colisa.....	27
6.8	Yugo escocés .....	27
6.9	Mecanismo Whitworth .....	28
6.10	Mecanismo de línea recta de Chebyshev .....	28
6.11	Construccionismo.....	28
6.12	Modelo.....	29
6.13	Sistema modular .....	29
7.	Propuesta solución .....	29
7.1	Definición de la metodología mecatrónica .....	30
7.2	Desarrollo de la propuesta solución.....	31
7.2.1	Necesidades y requerimientos.....	31
7.2.2	Matriz de trazabilidad .....	32
7.2.3	Arquitectura funcional .....	33
7.2.4	Modelado de la interconexión de funciones IDEF-0.....	38
7.2.5	Arquitectura física del sistema mecatrónico.....	38
7.2.6	Diseño del dominio específico .....	54
7.2.7	Manufactura e implementación.....	115
7.2.8	Control de cambios .....	133
8	Administración del proyecto .....	135
8.1	Costos .....	135
8.2	Planeación y tiempos de actividades .....	136
9	Conclusiones.....	138



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

10 Anexos .....	140
ANEXO NO. 1 DataSheet Transistor 2N2222 .....	141
ANEXO NO. 2 DataSheet sensor .....	142
ANEXO NO. 3 DataSheet Motor .....	143
ANEXO NO. 4 Diseño PCB.....	144
ANEXO NO. 5 Plano explosionado Biela manivela corredera .....	145
ANEXO NO. 6 Plano eslabones .....	146
ANEXO NO. 7 Plano corredera virtual .....	147
ANEXO NO. 8 Plano Pernos.....	148
ANEXO NO. 9 Plano base de ensamble .....	149
ANEXO NO. 10 Plano base del mecanismo .....	150
ANEXO NO. 11 Plano base del motor.....	151
ANEXO NO. 12 Plano corredera .....	152
ANEXO NO. 13 Planos ejes .....	153
ANEXO NO. 14 Componentes Yugo Escocés .....	154
ANEXO NO. 15 Componentes Colisa oscilatoria .....	155
ANEXO NO. 16 Componentes Mecanismo de Whitworth.....	156
ANEXO NO. 17 Componentes Manivela balancín .....	157
ANEXO NO. 18 Componentes Doble manivela.....	158
ANEXO NO. 19 Componentes Doble Balancín.....	159
ANEXO NO. 20 Componentes Mecanismo Chebyshev.....	160
10. Referencias .....	161



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

## Índice de Figuras

Figura 1. Relación de prácticas .....	14
Figura 2. Elementos clave de la mecatrónica [3].....	16
Figura 3. Ventajas de jugar con bloques didácticos .....	18
Figura 4. División de la Mecánica para su estudio .....	23
Figura 5. Tipos de eslabones.....	24
Figura 6. Mecanismo de cuatro barras .....	25
Figura 7. Biela- manivela- balancín .....	25
Figura 8. Mecanismo doble manivela .....	26
Figura 9. Mecanismo doble balancín .....	26
Figura 10. Sistema biela-manivela. ....	26
Figura 11. Mecanismo biela-manivela-corredera descentrado.....	27
Figura 12. Colisa.....	27
Figura 13. Yugo escocés [18].....	27
Figura 14. Mecanismo de Whitworth [19] .....	28
Figura 15. Mecanismo de Chebyshev .....	28
Figura 16. Modelo VDI-2206.....	30
Figura 17. Diseño del sistema .....	31
Figura 18. Diagrama FBS .....	35
Figura 19. IDEF-O A0.....	36
Figura 20. Diagrama IDEF-0 Expandido .....	37
Figura 21. Diagrama FBS .....	38
Figura 22. IDEF-O A0 .....	38
Figura 23. Diagrama IDEF-0 expandido .....	38
Figura 24. Sistemas y módulos.....	39
Figura 25. Control numérico App Designer.....	40
Figura 26. Matlab y Arduino .....	40
Figura 27. Boceto Sistema 1.....	44
Figura 28. Boceto sistema 2 .....	44
Figura 29. Niveles de ponderación Saaty a) Nueve niveles b) Cinco niveles .....	47
Figura 30. Biela manivela corredera centrada .....	54
Figura 31. Biela manivela corredera descentrada.....	55
Figura 32. Mecanismos de cuatro barras.....	56
Figura 33. Yugo escocés .....	57
Figura 34. Colisa rectilínea .....	58
Figura 35. Mecanismo de Whitworth .....	59
Figura 36. Lazo del mecanismo biela corredera descentrada .....	61
Figura 37. Mecanismo de manivela biela corredera .....	61
Figura 38. Biela manivela corredera para análisis dinámico .....	61





**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Figura 39. Fuerzas en la corredera .....	63
Figura 40. Fuerzas en el eslabón 2 .....	65
Figura 41. Fuerzas en el eslabón 1 .....	67
Figura 42. Resultados del análisis de cinemática realizado en Matlab.....	69
Figura 43. Resultados de cálculos en MATLAB.....	70
Figura 44. Posición Working Model .....	70
Figura 45. Velocidad biela manivela corredera .....	70
Figura 46. Aceleración de la corredera .....	70
Figura 47. Variación ángulo Betha .....	71
Figura 48. Posición, velocidad y aceleración angular .....	72
Figura 49. Par del eslabón 2 .....	74
Figura 50. Par del eslabón en Working model .....	79
Figura 51. Par necesario para el motor según MATLAB.....	80
Figura 52. Par del motor en Working model .....	80
Figura 53. Motorreductor .....	81
Figura 54. Metales, polímeros, cerámicas, híbridos [31] .....	85
Figura 55. Módulo de Young vs Densidad. Tabla de materiales de nivel 2. ....	86
Figura 56. Gráfica de Granta con recta .....	87
Figura 57. Resultados para selección del material .....	87
Figura 58. Mecanismo en 3D realizado en SolidWorks .....	90
Figura 59. Tensiones de Von Misses en manivela .....	91
Figura 60. Factor de seguridad en la manivela.....	91
Figura 61. Tensiones de Von Misses manivela .....	92
Figura 62. Factor de seguridad de la manivela.....	92
Figura 63. Tensiones de Von Misses en la corredera .....	93
Figura 64. Factor de seguridad en la corredera .....	93
Figura 65. Tensiones de Von Misses en perno .....	94
Figura 66. Factor de seguridad en perno .....	94
Figura 67. Transistor seleccionado.....	98
Figura 68. Conexiones de ARDUINO con circuito de potencia .....	100
Figura 69. Simulación en ThinkerCAD corriente máxima de colector .....	101
Figura 70. Simulación en ThinkerCAD del corriente al 34% de PWM .....	101
Figura 71. Ventajas de normas IPC .....	102
Figura 72. Reglas para trazado de pistas.....	103
Figura 73. Trazado de pistas PCB .....	104
Figura 74. Simulación 3D del PCB .....	104
Figura 75. Árbol de decisiones para selección de sensor .....	105
Figura 76. Herramienta de selección de sensores ultrasónicos Digikey.....	105
Figura 77. Conexión de sensor y placa Arduino .....	108
Figura 78. Conexiones finales .....	108



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Figura 79. Placa PCB propuesta por técnica de planchado a) Sin tinta protectora b) Con tinta protectora...	109
Figura 80. Principios de diálogos ergonómicos .....	110
Figura 81. Panel frontal.....	111
Figura 82. Modelo de ingeniería de software lineal secuencial .....	112
Figura 83. Propuesta de interfaz de usuario .....	113
Figura 84. Diagrama entidad relación para la arquitectura del sistema.....	114
Figura 85. Mecanismos desarrollados en SolidWorks parte 1 .....	115
Figura 86. Mecanismos desarrollados en SolidWorks parte 2 .....	116
Figura 87. Impresión de las piezas .....	117
Figura 88. Ensamble del mecanismo físico. ....	118
Figura 89. Visualización del mecanismo físico. ....	119
Figura 90. Mecanismo biela manivela corredera en SolidWorks .....	120
Figura 91. Configuración del archivo .wrl en VRSink.....	121
Figura 92. Matlab Function con ecuaciones.....	121
Figura 93. Configuración de rotaciones y traslaciones.....	122
Figura 94. Diagrama para funcionamiento del mecanismo .....	122
Figura 95. Visualización del movimiento en VRsink .....	123
Figura 96. Bloques para simulación interactiva .....	124
Figura 97. Implementación de simulación interactiva .....	124
Figura 98. Add-Ons para conectar Arduino a Matlab.....	125
Figura 99. Configuración de placa.....	125
Figura 100. Test de conexión completo .....	126
Figura 101. Primera versión de interfaz de comunicación .....	126
Figura 102. Interfaz con mediciones de sensor.....	127
Figura 103. Versión 3 de la aplicación.....	127
Figura 104. Simulación interactiva.....	128
Figura 105. Mini App BLOCKMechanics .....	129
Figura 106. Simulación 2D y graficas de resultados .....	130
Figura 107. Simulación 2D y Graficación .....	130
Figura 108. Sección conexión con Arduino .....	131
Figura 109. Sensor final VI5310.....	133
Figura 110. Desarrollo de interfaz de comunicación en Matlab .....	133
Figura 111. Horas dedicadas al proyecto .....	136
Figura 112. Horas de trabajo por etapa .....	137
Figura 113. Porcentaje de horas .....	137

## Índice de tablas

Tabla 1. Proyectos desarrollados y sus aportes .....	20
Tabla 2. Antecedentes .....	22
Tabla 3. Necesidades .....	31



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Tabla 4. Requerimientos .....	32
Tabla 5. Matriz de trazabilidad .....	33
Tabla 6. Matriz morfológica .....	38
Tabla 7. Criterios por función y característica .....	45
Tabla 8. Criterios de evaluación finales.....	46
Tabla 9. Matriz de ponderación de criterios. ....	48
Tabla 10. Matriz de ponderación de criterios normalizada.....	48
Tabla 11. Ponderación de criterios .....	49
Tabla 12. Vector de ponderación.....	49
Tabla 13. Vector de ponderación total .....	51
Tabla 14. Tabla de ponderación de criterios .....	52
Tabla 15. Escala método de ponderación .....	52
Tabla 16. Tabla de comparación entre tarjetas .....	53
Tabla 17. Comparación entre tarjetas.....	53
Tabla 18. Comparación entre software.....	53
Tabla 19. Tabla de comparación entre software.....	53
Tabla 20. Mecanismos totales .....	54
Tabla 21. Restricciones, funciones, objetivos y variables libres para selección del material .....	84
Tabla 22. Matriz multicriterio AHP para selección del material .....	88
Tabla 23. Matriz normalizada de selección de material .....	88
Tabla 24. Vector de prioridad de criterios .....	88
Tabla 25. Características de los materiales .....	89
Tabla 26. Comparación de características entre BJT Y MOSFET .....	96
Tabla 27. Matriz de comparación de criterios.....	96
Tabla 28. Matriz normalizada .....	96
Tabla 29. Matrices de comparación de soluciones por criterio .....	97
Tabla 30. Vector de ponderación total para selección de componente de etapa de potencia .....	97
Tabla 31. Ancho de pista según corriente.....	103
Tabla 32. Características de los sensores .....	106
Tabla 33. Matriz multicriterio AHP de criterios de selección de sensores .....	106
Tabla 34. Matriz normalizada de selección de sensor.....	106
Tabla 35. Vector de prioridad de criterios para selección del sensor .....	106
Tabla 36. Matrices de selección de sensor.....	107
Tabla 37. Vector de ponderación total de selección del sensor.....	107
Tabla 38. Lista de componentes electrónicos .....	109
Tabla 39. Tabla de control de cambios .....	134
Tabla 40. Costos del proyecto .....	135
Tabla 41. Horas por integrante planeadas .....	136
Tabla 42. Horas reales dedicadas.....	136
Tabla 43. Planeación de actividades parte 1 .....	140



## **Resumen**

El presente trabajo planea el diseño de una herramienta que pueda construirse mediante bloques didácticos modulares y que permita favorecer el aprendizaje de temas relacionados con la asignatura de Análisis y síntesis de mecanismos de acuerdo con el programa sintético de la Unidad Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas (UPIITA). La herramienta estará compuesta por una interfaz de usuario que permitirá el modelado de la cinemática de nueve mecanismos, una tarjeta de adquisición de datos y un conjunto de piezas modulares que permitan la creación de un mecanismo físico, esta herramienta podrá funcionar como prácticas para el desarrollo de la asignatura anteriormente mencionada.

*Palabras clave: mecanismos, análisis, modelado, cinemática, didáctica, modular.*

## **Abstract**

The present document states the design of a tool that can be built using modular didactic blocks and that increases the learning of topics related to the subject of analysis and synthesis of mechanisms according to the synthetic program of the Unidad Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas (UPIITA). The tool composed of a user interface that will allow the modeling the kinematics of nine mechanisms, a data acquisition card and a set of modular pieces that will allow the creation of a physical mechanism, this tool can be executed as practices for the development of the aforementioned subject.

*Keywords: mechanisms, analysis, modeling, kinematics, didactics, modular.*

## **1. Introducción**

Las universidades y otras instituciones como el Instituto Politécnico Nacional, tuvieron que cerrar sus puertas y cambiar por completo su método de enseñanza pasando de la formación presencial a la modalidad en línea como consecuencia de la contingencia sanitaria de COVID- 19, con esto se puede notar que muchas de las actividades no estaban planeadas para favorecer el aprendizaje de manera autónoma para el estudiante, en ocasiones de manera presencial tampoco se cuenta con los recursos suficientes para poder realizar prácticas de todas las asignaturas que lo plantean en su programa sintético, ya que no se tiene el presupuesto para la construcción de laboratorios que permitan la realización de estas prácticas y que al final perjudican al estudiante porque pierde la oportunidad de generar conocimientos mediante el construccionismo, este es el caso de la asignatura de análisis y síntesis de mecanismos, que forma parte del plan de estudios de ingeniería mecatrónica. El propósito de este proyecto es desarrollar una estrategia accesible para que el alumno pueda favorecer su aprendizaje ya sea en forma presencial en la escuela o en situaciones extraordinarias como en la que se encuentra actualmente la sociedad, en donde el alumno pueda desarrollar practicas con la construcción virtual y/o física de mecanismos para desarrollar su modelado y su interacción mediante una interfaz gráfica,





## TRABAJO TERMINAL INGENIERÍA MECATRÓNICA

procurando así cubrir los temas y las practicas planteadas en el programa sintético como: 1) Posición, 2) Velocidad, 3) Aceleración , 4) Diseño y construcción de un prototipo de un mecanismo, las cuales se muestran en la Figura 1.

### 2. Planteamiento del problema

Como consecuencia de la contingencia iniciada a principios del año 2020, las universidades y otras instituciones dedicadas a la educación tuvieron que cerrar sus puertas y cambiar por completo su método de enseñanza pasando de la formación presencial a la modalidad en línea, esto incluye algunas carreras donde se imparten materias o unidades de aprendizaje cuyos contenidos comprenden temas de mecánica, particularmente la asignatura de Análisis y síntesis de mecanismos, debido a su elementalidad en ingeniería, puesto que en ella se desarrollan los conocimientos y habilidades para el análisis cinemático y dinámico de máquinas y mecanismos que se requieren en el diseño e implementación de sistemas mecatrónicos, además, sus contenidos son imprescindibles y previos a asignaturas como Diseño básico y avanzado de máquinas, Automatas industriales, entre otras.

El objetivo de esta materia es que los alumnos puedan desarrollar la capacidad de analizar movimiento cinemático de mecanismos que integran una máquina. En este sentido, esta asignatura permite al alumno poner en práctica sus conocimientos de Estática, Dinámica, Ecuaciones diferenciales y Álgebra vectorial, asignaturas que corresponden al Nivel I de la carrera.

Una vez teniendo como exordio lo antes dicho, la problemática que se observa en esta materia es que en el curso presencial no se lleva a cabo prácticas de manera física de tal forma que el estudiante únicamente aprende a obtener valores de manera analítica sin observar el comportamiento.

Con base en el programa sintético de la unidad de aprendizaje de Análisis y Síntesis de Mecanismos dentro de la Orientación Didáctica se menciona:



Se utilizará la estrategia de enseñanza-aprendizaje orientado a proyectos AOP. El facilitador aplicará los métodos de enseñanza heurístico, deductivo, inductivo, analítico y sintético. Las técnicas que auxiliarán a la estrategia seleccionada serán las siguientes: Análisis y solución de problemas, desarrollo de simulaciones numéricas y algoritmos computacionales, indagación bibliográfica y cibergráfica, exposiciones, desarrollo de prácticas con sus respectivos reportes, desarrollo del proyecto y discusiones guiadas.

Es aquí donde se puede identificar el problema ya que en la UPIITA no hay herramientas que permitan al alumno construir los mecanismos físicamente y al mismo tiempo apoyen los métodos de enseñanza que se marcan en el programa académico. Esta misma herramienta didáctica permitirá trabajar con modelos matemáticos mediante los algoritmos computacionales que se definan durante el desarrollo de este trabajo



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

terminal, además de la construcción virtual (9 mecanismos) y física (1 mecanismo), apoyando así la educación de los estudiantes.

En la página 8 del programa sintético de la asignatura presenta las prácticas que deben desarrollarse durante el ciclo escolar. En la Figura 1 se muestran enlistadas.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA ACADÉMICA

DIRECCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR



UNIDAD DE APRENDIZAJE: Análisis y Síntesis de Mecanismos.

HOJA: 8 DE 11

RELACIÓN DE PRÁCTICAS

PRÁCTICA No.	NOMBRE DE LA PRÁCTICA	UNIDADES TEMÁTICAS	DURACIÓN	LUGAR DE REALIZACIÓN
1	Posición.	II	1.5	Laboratorio de Mecanismos.
2	Velocidad.	II	1.5	
3	Aceleración.	II	3.0	
4	Tren de engranajes.	III	1.0	
5	Diagramas cinemáticos y diseño gráfico del perfil de levas.	III	1.0	
6	Generación de trayectoria.	IV	4.0	
7	Diseño y Construcción de un prototipo de mecanismo.	II - V	12.0	
8	Control de un mecanismo 2D.	V	3.0	
		<b>TOTAL DE HORAS</b>	27.0	
<b>EVALUACIÓN Y ACREDITACIÓN:</b>				

Figura 1. Relación de prácticas

### 3. Justificación

#### 3.1 Social

La pandemia de COVID-19 intensificó y mostró las desigualdades sociales, políticas y económicas, además de que ha aumentado significativamente el desempleo mundial.



Por otra parte, esta pandemia ha tenido graves consecuencias que afectan a la educación, de acuerdo con la Agenda 2030 [1], durante la última década se consiguieron grandes avances en el acceso a la educación, ya que las tasas de matriculación en las escuelas en todos los niveles crecieron a nivel. No obstante, en 2020, a medida que la pandemia de la COVID-19 se propagó, la mayor parte de los países anunciaron el cierre temporal de las escuelas, lo que afectó a más del 90 % de los estudiantes del mundo. En abril de 2020, cerca de 1600 millones de niños y jóvenes estaban fuera de la escuela, de acuerdo con cifras de la Organización de las Naciones Unidas.

Nunca habían estado tantos estudiantes fuera de la escuela al mismo tiempo, y este tiempo fuera de las aulas alteró su aprendizaje y cambió drásticamente sus vidas, 68.3% del material utilizado en las escuelas de nivel medio superior es digital sin embargo es necesario contar con herramientas que permitan potencializar el aprendizaje en línea para que sea asequible para cualquier persona con una computadora y con internet (para descargar el programa) y usando herramientas de fácil acceso.

### **3.2 Técnica**

De acuerdo con el Dr. Jaime Julián Cid Monjaraz. Senior Member del “Institute of Electrical and Electronics Engineers”, Inc. (IEEE) [2], la mecatrónica actual es un área clave de desarrollo en la sociedad moderna, ya que se considera como sinónimo de modernización tecnológica por su naturaleza multidisciplinaria. Él menciona que la mecatrónica permite generar y aplicar conocimientos y/o tecnologías a problemas reales del entorno y que por su campo de aplicación se relaciona con un conjunto bastante amplio de disciplinas, por lo que el estudio de sistemas mecatrónicos puede ser dividido en las siguientes áreas:

1. Modelo físico de sistemas.
2. Sensores y actuadores.
3. Señales y sistemas.
4. Computadoras y sistemas electrónicos.
5. Programación y adquisición de datos.

Los elementos clave de la mecatrónica están ilustrados en la Figura 1. Al seguir madurando el campo de la mecatrónica, la lista de temas relevantes asociados con el área seguramente se expandirá y evolucionará.



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA



Figura 2. Elementos clave de la mecatrónica [3]

Uno de los conceptos de mecatrónica mencionados en el artículo del Dr. Monjaraz define a esta ingeniería como una ingeniería multidisciplinaria de carácter científico y tecnológico que integra las áreas de mecánica, electrónica, informática, control automático y administración de proyectos, con el auxilio de otras áreas del conocimiento para analizar, desarrollar y diseñar sistemas con la finalidad de mejorar la calidad, flexibilidad, bajos costos y productividad de procesos y productos dentro de una amplia gama de aplicaciones científicas, industriales, servicios comerciales, medicina y para beneficiar e impactar a todos los sectores de la sociedad.

El proyecto planteado en este documento es mecatrónico gracias a que integrará los modelos físicos de sistemas haciendo uso de computadoras y sistemas electrónicos junto con actuadores, además de la programación y adquisición de datos, ya que se usarán equipos y sistemas de instrumentación de ingeniería de software.

La mecatrónica siempre ha sido considerada como la integración de varias áreas de la ingeniería, sin embargo, lo más importante es saber cómo integrarlas, ya que un sistema puede ser considerado mecatrónico sin hacer uso de todas las áreas que lo componen.





El conocimiento que el ingeniero mecatrónico tiene sobre estas áreas permite que la sinergia entre éstas sea una herramienta indispensable para la solución de una problemática, entendiendo como sinergia a la unión de dos o más elementos trabajando en conjunto para realizar una tarea determinada con fin de lograr uno o más objetivos.

## **Objetivos**

### **4.1 Objetivo general**

Diseñar e implementar una herramienta didáctica capaz de realizar la recreación virtual y física de prácticas a través de bloques modulares de la asignatura de análisis y síntesis de mecanismos.

### **4.2 Objetivos específicos**

#### **4.2.1 Objetivos específicos de Trabajo Terminal I**

- Diseñar y simular los bloques de construcción didácticos por medio de SolidWorks basándose en las medidas en piezas ya existentes en el mercado para el armado de manera física del mecanismo.
- Comparar y evaluar los componentes electrónicos adecuados a través de matrices multicriterio AHP para verificar que las soluciones son las más viables.
- Comparar y evaluar el material adecuado a través del método de selección de materiales de M.F. Ashby para la manufactura de las piezas con el material y método más adecuado de acuerdo con los criterios definidos.
- Estructurar la interfaz de trabajo apoyados de la ingeniería de software para que el usuario pueda interactuar con su mecanismo de manera virtual.
- Desarrollar la programación adecuada que permita la comunicación del software con la tarjeta de desarrollo para la examinación de su comportamiento de manera física.

#### **4.2.2 Objetivos específicos de Trabajo Terminal II**

- Manufacturar los bloques didácticos haciendo uso de la tecnología de impresión 3D para la verificación de su funcionamiento en el mecanismo.
- Integrar e implementar los algoritmos del movimiento de los mecanismos a través del programa de MATLAB para la verificación de su comportamiento de manera virtual.
- Implementar la interfaz humano-máquina por medio del programa MATLAB para suscitar la comunicación entre el usuario y el sistema.
- Evaluar el comportamiento de todos los subsistemas para la verificación del buen funcionamiento del sistema en conjunto.



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

- Experimentar con el sistema físico con la construcción del mecanismo físico y evidenciar el funcionamiento del mecanismo.

#### 4. Estado del arte y Estado de la técnica

Desde años atrás se ha estudiado la implementación de bloques didácticos de construcción en las aulas, ya que se había observado que fomentaban muchas habilidades. Algunas de las ventajas de tener contacto con este tipo de juguetes se muestran en la Figura 3:



Figura 3. Ventajas de jugar con bloques didácticos

Gracias a estas ventajas, se han ido implementando metodologías para el uso de juegos LEGO® en personas de diferentes edades. Una de ellas es llamada Lego Serious Play (LSP), esta metodología va dirigida a personas jóvenes, universitarios y hasta profesionales ya que se considera para ellos como un punto de partida para una mejora personal y profesional. Esta metodología ha evidenciado la diversidad de formas en que estos bloques didácticos se pueden aplicar en todas las disciplinas para hacer aprendizaje y enseñanza estimulantes y atractivos [4].

A su vez la compañía LEGO®, desde hace varios años, está promocionando diversos juegos fusionando las habilidades de cómputo y programación además de enfocarse en diferentes edades. Cuenta con diversos kits:

- **LEGO-Progress:** está enfocado a niños entre 8-9 años. Su objetivo principal es que se aprendan habilidades básicas de programación.



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

- **LEGO-Technics:** está dirigida a los estudiantes entre 9 y 10 años. Los alumnos comprenden el funcionamiento de algunas máquinas, como paso previo a la robótica avanzada. Invita a seguir con el aprendizaje autónomo, promoviendo la investigación de algunos principios de las máquinas simples y así puedan adquirir bases relacionadas con los conceptos de física, mecánica, fuerza, etc.
- **LEGO-Minds:** los niños entre 10 y 12 años es el público objetivo de esta gama. Permite la construcción de robots.

Lisa Marshall, responsable de aprendizaje computacional para Lego menciona que cuando el proceso creativo inicia las preguntas: “Cuando comienza a ponerse creativo es en el momento que dicen, ¿Ahora cómo hago que la boca de este cocodrilo se mueva?, ¿Puedo usar otro modelo? o ¿Puedo cambiar el movimiento para que haga algo diferente? ¿Tengo que cambiar los motores? ¿Qué código tengo que cambiar?”. En este sentido, coincide con lo que menciona Acuña, coordinadora del Área de Robótica y Aprendizaje por Diseño en el Centro de Innovación Educativa; ya que considera que el ambiente de aprendizaje se caracteriza por el cuestionamiento permanente acerca del funcionamiento de las cosas, en donde la discusión en torno a ¿Por qué pasa lo que pasa?

La robótica educativa une lo lúdico con lo interdisciplinario, logrando que los estudiantes comprendan los contenidos curriculares al verlos materializados en proyectos que implican diseño, investigación, construcción [5].

Para robótica, en especial para la implementación de Lego® Mindstorms® se han desarrollado diversos simuladores tanto en softwares como en hardware. Estos han comprobado su utilidad como parte del material didáctico en diversos cursos de robótica.

Analizando algunos de los protocolos que fueron realizados en distintas universidades e instituciones educativas se encontraron dos que mostraron similitudes con el proyecto que se desea desarrollar. Uno de los proyectos se titula diseño y desarrollo de un videojuego educativo basado en la implementación de modelos computacionales e inteligencia artificial, este proyecto de igual manera es educacional proporcionando un aprendizaje informal en diversas asignaturas del plan de estudios de ingeniería Mecatrónica que se oferta en UPIITA, por medio de un software que permita demostrar cómo se lleva a cabo el análisis matemático de distintos mecanismos.

Por otra parte, el proyecto titulado sistema modular didáctico para el aprendizaje de tópicos de ingeniería Mecatrónica muestra demasiada similitud con el proyecto ya que implementa bloques modulares de igual manera además de una tarjeta y un servo actuador.

Lo que se busca en este proyecto es fusionar ambas ideas planteadas en los protocolos para una mayor experiencia a los estudiantes ya que el proyecto consistirá en un software similar al primer proyecto, pero enfocado únicamente a la parte de mecanismos, por otro lado, el segundo proyecto se enfoca más en el hardware por lo que es posible realizar mejoras para hacerlo más amigable con el usuario. En la Tabla 1 se resumirán los trabajos que se han desarrollado.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



*Tabla 1. Proyectos desarrollados y sus aportes*

NO.	PROYECTO	VENTAJAS	DESVENTAJA	APORTE
1	Desarrollo de escenarios virtuales para software de robótica educativa en 3D [6]	<p>Se desarrolló con el objetivo de aprender conceptos básicos de robótica</p> <p>Es un complemento didáctico útil para profesores y alumnos</p> <p>Es interactivo y fácil de manejar</p>	La programación que el usuario realizó no se puede aplicar en un robot físico únicamente se queda en la parte virtual.	Entornos 3D
2	Programación con lego para la Educación [7]	<p>La implementación con el robot LEGO MINDSTORMS han sido de gran impacto en los estudiantes.</p> <p>Interés por interactuar con el robot para diseñar, construir y programar con la herramienta maximizando el aprovechamiento dentro del aula de una forma innovadora. El alumno se sentirá identificado e incitado a seguir desarrollando más proyectos.</p>	No tiene uso de otro lenguaje de programación como lo es C con el software llamado BRICX o JAVA con el software llamado Eclipse	
3	Diseño mecánico, construcción Virtual y simulación cinemática en SolidWorks De los modelos LEGO© TECHNIC: vLTm 8446-1, vLTm 8448 y LTm 9396-1. [8]	<p>Reproducir sistemas mecánicos reales en un espacio virtual, mediante el sistema de construcción LEGO© Technic.</p> <p>Usar estos modelos virtuales para ayudar en el diseño de los mecanismos a la hora de encontrar soluciones “auto alineadoras”.</p>	A la hora de simular los contactos entre las ruedas y la base, puesto que los cálculos que debe realizar COSMOS Motion serán altamente complicados y pueden dar lugar a errores y a demoras	Ampliar el conocimiento sobre la utilización de programas informáticos de diseño mecánico, en concreto de SolidWorks



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

		<p>Obtener una visión ampliada de los mecanismos que se desean diseñar.</p> <p>Representar distintos mecanismos y máquinas y así resolver de manera eficaz diferentes problemas de diseño en modelos reales</p>	<p>excesivas en los periodos de cálculo.</p>	
<b>4</b>	<p>Modelado y Simulación de un Robot LEGO Mindstorms EV3 mediante V-REP y Matlab</p>	<p>Modelo en 3 dimensiones del robot con una herramienta CAD gracias al software LeoCAD de manera sencilla</p> <p>Su adaptación en V-REP añadiendo formas puras, su disposición en la jerarquía de la escena y creación de la interfaz gráfica de la pantalla, luces y botones del bloque central</p>	<p>Creación de una nueva toolbox con funciones de lenguajes desarrollados para robots EV3 reales sustituyendo a las funciones de NXC.</p> <p>Adaptar el modelo ya desarrollado para poder simular múltiples robots LEGO EV3 y crear sistemas multi-robot utilizando sufijos numerados en V-REP para identificar cada uno de ellos.</p>	
<b>5</b>	<p>Prototipo de Sistema Modular Didáctico para el Aprendizaje de Tópicos de Ingeniería Mecatrónica [9]</p>	<p>Diseñan y construyen una tarjeta de adquisición de datos</p> <p>Diseñan y construye un servo actuador Plug and Play, en donde se integre un codificador óptico y un motorreductor de cd</p> <p>Diseño de dos prácticas para conocer el uso del prototipo</p>	<p>Pocas prácticas para cubrir el temario</p> <p>Las piezas no son completamente modulares</p> <p>Muy pesado</p>	<p>Diseñar y fabricar piezas modulares que permitan ser conectadas de diferentes formas entre sí, para formar nuevas súper piezas y mecanismos</p>



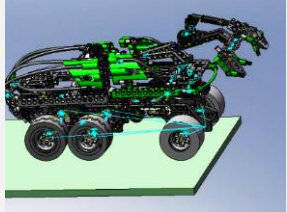
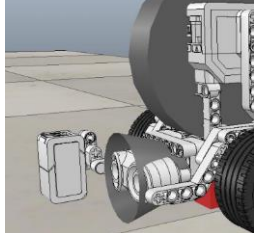




**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

## 5. Antecedentes

*Tabla 2. Antecedentes*

NO.	NOMBRE	AUTOR	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS	AÑO	PAÍS	ORG	IMAGEN
1	Desarrollo de escenarios virtuales para software de robótica educativa en 3D [6]	Gabriela Diego Hernández	Simulador que permite la construcción de robot y que este se desplace a través del escenario con sonidos de movimiento para mayor realismo.	Muestra paso a paso de manera gráfica, el inicio y fin del proyecto, el estudiante utiliza esta guía para la elaboración y ensamblado de su robot.	2017	México	UNAM	
2	Programación con lego para la Educación [7]	Paulina Cecilia Barrón Sánchez  Aurelio Cortes López	Propone estrategias para el desarrollo de habilidades de programación con el uso de la herramienta LEGO MINDSTROMS NXT para mejorar el proceso enseñanza – aprendizaje.	Propone la programación de un seguidor de línea	2015	México	UAEH	
3	Diseño mecánico, construcción Virtual y simulación cinemática en Solidworks de los modelos LEGO© TECHNIC: vLTm 8446-1, vLTm 8448 y LTm 9396-1. [8]	Borja Pérez Zafrilla	Implementación de un sistema de representación virtual de mecanismos y máquinas, apoyándose en el sistema de construcción LEGO© Technic.	Simulación de construcción de mecanismos “auto alineado”  Uso de interfaz de COSMOS Motion	2015	España	UPV	
4	Modelado y Simulación de un Robot LEGO Mindstorms EV3 mediante V-REP y Matlab	Alberto Martín Domínguez	Entorno de simulación V-REP con un robot móvil LEGO Mindstorms EV3, manejado mediante una toolbox de Matlab en el lenguaje NXC.	El modelo de robot posee una configuración de ruedas diferencial mediante dos motores, que serán los actuadores, y una rueda arrastrada;	2016	España	ETSI	



## 6. Marco teórico

### 6.1 Mecánica

Según Shigley [10], Mecánica es una rama de la ciencia que estudia los movimientos, tiempos y fuerzas, y se divide en dos partes, estática y dinámica. La estática la define como el análisis de sistemas estacionarios, es decir, de aquellos en que el tiempo no es un factor determinante, y la dinámica se refiere a los sistemas que cambian con el tiempo.

El estudio de movimiento de un cuerpo rígido puede definirse en partes, una geométrica y la otra mecánica. En la primera de ellas, se estudia el cambio de posición de un punto a otro sin preocuparse por las causas que provocan este cambio de posición, se representa en formulas analíticas, las que definirán la posición.

Euler divide la dinámica en dos partes: Cinemática y Dinámica, esta división la realizó tomando en cuenta que se deben tratar con cuerpos rígidos. Por lo tanto, aunque todas las piezas de máquinas y mecanismos reales son flexibles en cierto grado, éstas se diseñan casi siempre con materiales más o menos rígidos y tomando en cuenta que sus deformaciones son mínimas. Por lo que al analizar el funcionamiento cinemático de los mecanismos no se toman en cuenta las deflexiones ya que son despreciables y las piezas son rígidas.

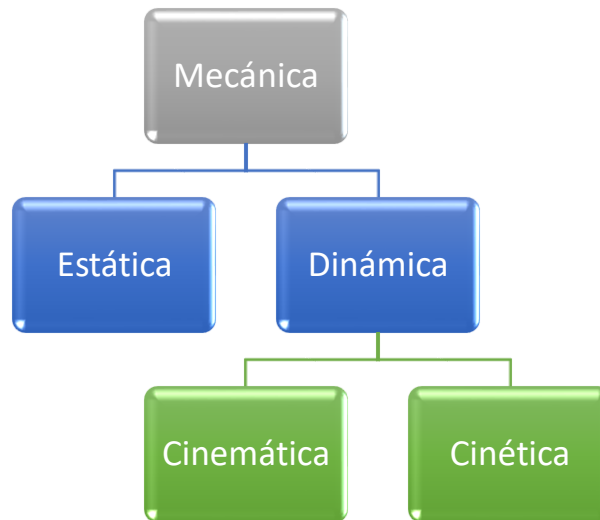


Figura 4. División de la Mecánica para su estudio

Como se puede observar en la Figura 4, la dinámica se compone de la cinética y la cinemática. En la práctica, la diferencia entre la cinemática y la cinética recae en la forma en que se debe analizar una máquina o en su caso algún componente.

En la cinética se estudia la causa del movimiento. La cinemática describe y analiza el efecto del movimiento sobre los cuerpos sin tener en cuenta las causas. En este caso, lo importante es analizar los aspectos geométricos del movimiento. Las coordenadas describen la posición de un cuerpo en cada momento. Se analizan la trayectoria, la velocidad y la aceleración [11].



TRABAJO TERMINAL  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

## 6.2 Mecanismo

Reuleaux definió un mecanismo como una combinación de cuerpos resistentes conectados por medio de articulaciones móviles para formar una cadena cinemática cerrada con un eslabón fijo, y cuyo propósito es transformar el movimiento [12].

Una máquina es una configuración de elementos con el objetivo de efectuar trabajo, ya sea para aplicar potencia o cambiar su dirección; es diferente a un mecanismo por su propósito. En una máquina es muy importante la fuerza, el par motor, el trabajo o potencia, por el contrario, un mecanismo, aunque puede transmitir la potencia su función principal es lograr un movimiento deseado. En este contexto se usará la palabra eslabón para designar un componente de un mecanismo.

Los eslabones de un mecanismo se deben conectar entre sí de una manera tal que transmitan movimiento, este movimiento debe ser transmitido el impulsor también llamado como eslabón de entrada, al seguidor, o conocido también como eslabón de salida.

En la Figura 5 se pueden observar algunos tipos de eslabones más utilizados en la asignatura de análisis y síntesis de mecanismos.

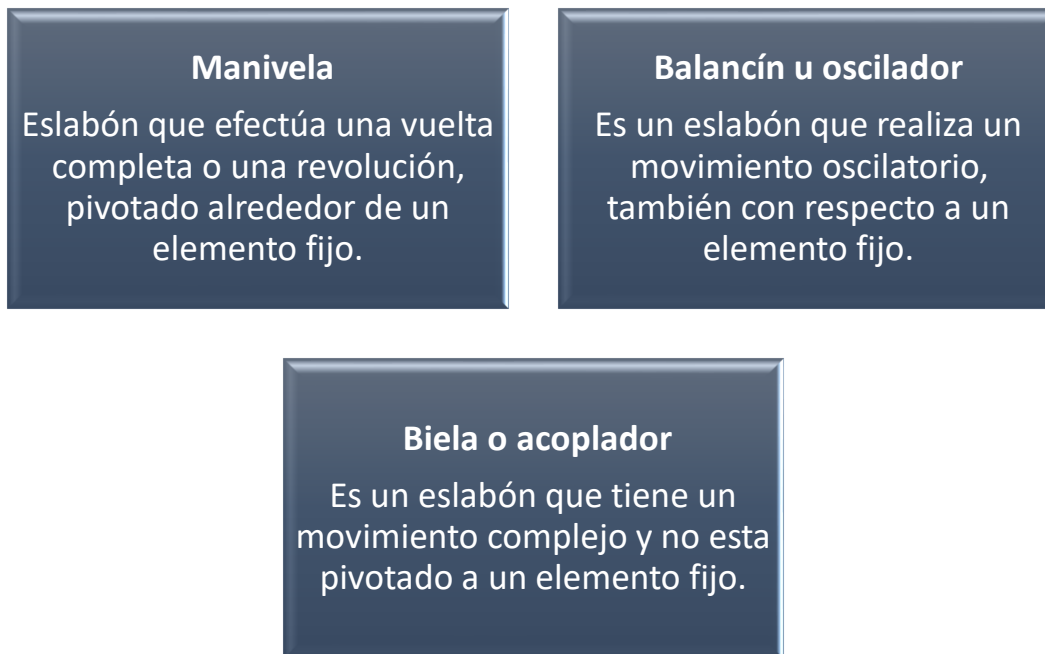


Figura 5. Tipos de eslabones

## TRABAJO TERMINAL INGENIERÍA MECATRÓNICA

### 6.3 Ley de Grashof

Cuando se diseña un mecanismo que será impulsado por un motor, una de las condiciones que se deben cumplir es que la manivela de entrada puede girar una revolución completa, ya que será donde se acoplará el motor. Para los mecanismos de cuatro barras, la ley de Grashof permite averiguar si se cumple esta condición, ya que afirma que la barra más corta de un mecanismo de cuatro barras da vueltas enteras respecto a todas las otras si se cumple que la suma de la longitud de la barra más larga ( $l$ ) y la de la más corta ( $s$ ) es más pequeña o igual que la suma de las longitudes de las otras dos ( $p$  y  $q$ ). Esto viene representado por la ecuación

$$s + l \leq p + q \quad (1)$$

En esta ley no se hace mención del orden de conexión de los eslabones, esto hace que se presenten diferentes combinaciones como la manivela-balancín, doble-manivela, doble-balancín.

### 6.4 Mecanismo cuatro barras

El mecanismo de cuatro barras es uno de los mecanismos más comunes es considerado como la cadena cinemática cerrada más simple de eslabones unidos con un grado de libertad. Está formado por un eslabón motriz y el eslabón de referencia. Este mecanismo puede tomar diferentes configuraciones. En la Figura 6 se muestran el eslabón motriz (1) y el eslabón de referencia (2).

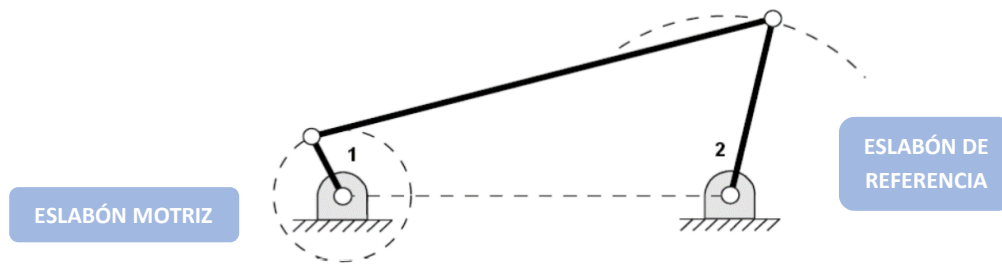


Figura 6. Mecanismo de cuatro barras [13]

#### 6.4.1 Mecanismo manivela-manivela

Este mecanismo tiene un miembro con un punto articulado fijo que se denomina manivela, este elemento Figura 6 puede dar vueltas enteras; también el mecanismo cuenta con un elemento llamado balancín que solamente puede oscilar además de un eslabón punto articulado fijo y recibe el nombre de biela o acoplador.

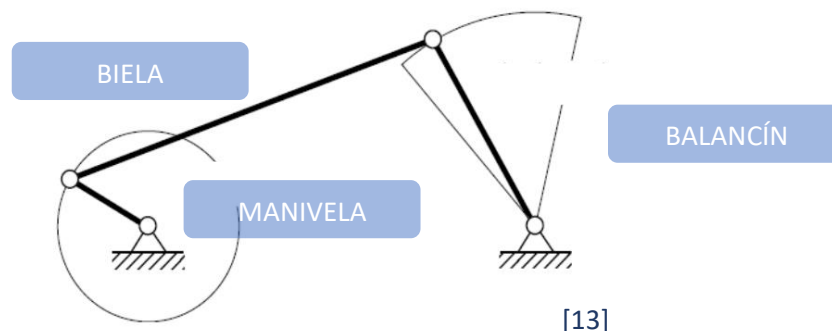


Figura 7. Biela- manivela- balancín [13]

## TRABAJO TERMINAL INGENIERÍA MECATRÓNICA

### 6.4.2 Mecanismo manivela-manivela

A partir de la cadena cinemática de 4 barras se obtiene este mecanismo cuando la barra más corta es la barra fija. Cuando las dos barras articuladas a la barra fija pueden realizar giros completos se les conoce como manivelas.

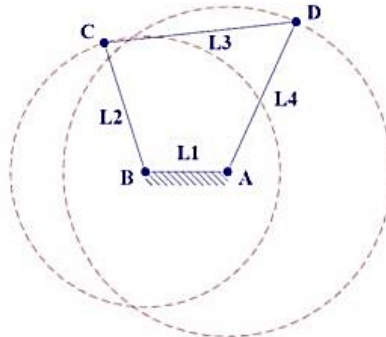


Figura 8. Mecanismo doble manivela [14]

### 6.4.3 Mecanismo balancín-balancín

Cuando un mecanismo no cumple una de las condiciones antes mencionadas, las dos barras que giran respecto al soporte se comportan como balancines lo que da como resultado a los (mecanismos de doble-balancín.

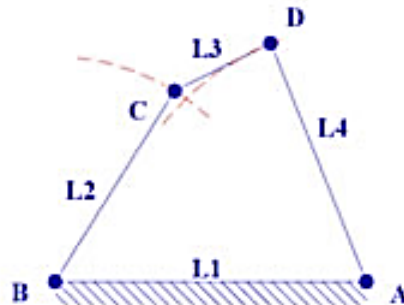


Figura 9. Mecanismo doble balancín [14]

### 6.5 Mecanismo Biela-manivela- corredera

El mecanismo biela-manivela es capaz de transformar el movimiento circular en movimiento rectilíneo. Este mecanismo está constituido por un elemento giratorio denominado manivela, conectado a una barra rígida llamada biela, de esta manera cuando gira la manivela, la biela está forzada a avanzar y retroceder sucesivamente.

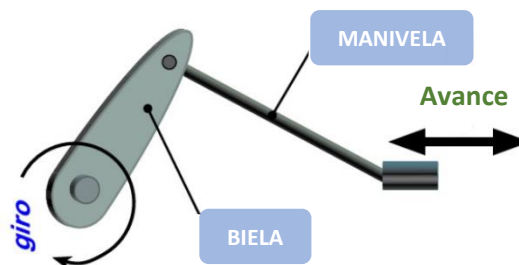


Figura 10. Sistema biela-manivela. [15]



## TRABAJO TERMINAL INGENIERÍA MECATRÓNICA

### 6.6 Mecanismo Biela-manivela- corredera descentrada

Como lo muestra la Figura 11, este mecanismo puede estar descentrado, lo que permite un movimiento rápido de retorno. Sin embargo, la cantidad de retorno rápido es muy pequeña, por lo que el mecanismo solamente se debe usar en los casos en los que el espacio está limitado y el mecanismo debe ser sencillo [16].

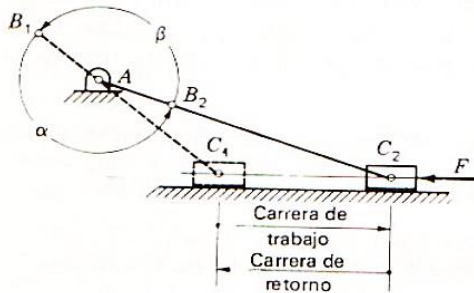


Figura 11. Mecanismo biela-manivela-corredera descentrado

[14]

### 6.7 Colisa

El mecanismo de colisa está compuesto por un elemento manivela, una corredera o bloque oscilante, una colisa (colisa de movimiento giratorio o colisa de movimiento oscilante dependiendo de si realiza o no un giro completo) y un cuarto eslabón que trabaja como soporte.

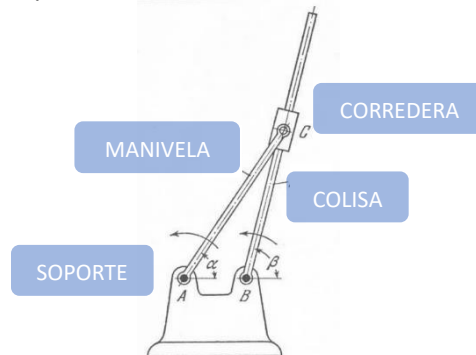


Figura 12. Colisa [17]

### 6.8 Yugo escocés

Este mecanismo permite convertir el movimiento rotacional de un control deslizante a un movimiento lineal. Si se acopla a un pistón, la forma del movimiento del pistón es una onda senoidal pura en el tiempo.

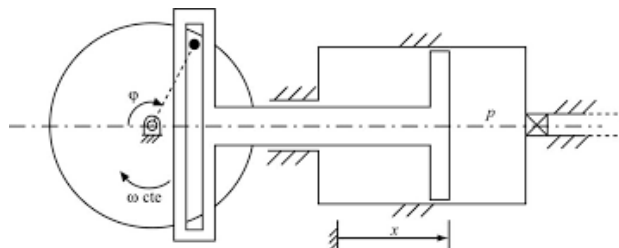


Figura 13. Yugo escocés

### 6.9 Mecanismo Whitworth

Este mecanismo transforma un movimiento de entrada giratorio continuo en movimiento rectilíneo alternativo. Debido a la configuración del mecanismo, éste realiza la carrera de retorno en menor tiempo que la carrera que la carrera de ida, de ahí su nombre de retorno rápido.

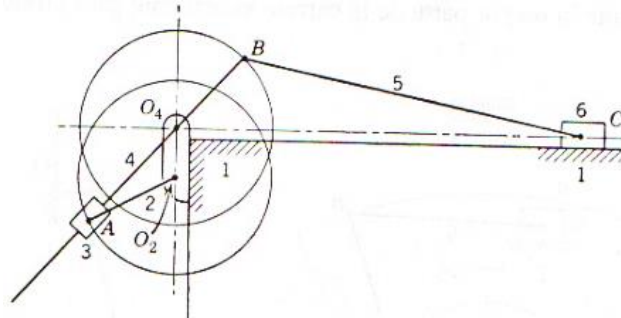


Figura 14. Mecanismo de Whitworth [19]

### 6.10 Mecanismo de línea recta de Chebyshev

Este es un mecanismo creado por Chebyshev (1821-1894) el cual es capaz de generar una trayectoria con un tramo aproximadamente recto a través del punto P.

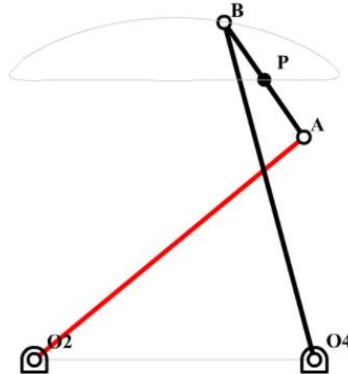


Figura 15. Mecanismo de Chebyshev [20]

### 6.11 Construccinismo

El proyecto adopta como sustento las teorías de filósofos conocidos como Piaget y Vygotski considerados como los padres del Constructivismo. Existe otra teoría conocida como Construccinismo de Seymour Papert.

El Construccinismo, sostiene que el conocimiento es construido por el que aprende también llamado sujeto activo, y que la mejor manera de lograr esta construcción es construyendo alguna cosa que tenga un significado social y pueda ser compartido. Además, esos objetos que son construidos deben ser "objetos para pensar", es decir, estos objetos deberían ser el medio para hacerse cuestionamientos más profundos como, por ejemplo, los conceptos matemáticos y científicos que son bases de estas actividades[21].



TRABAJO TERMINAL  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Ambas teorías son de gran relevancia ya que definen la importancia de la construcción física de los mecanismos para favorecer el aprendizaje de su funcionamiento. En el caso de Piaget y Vygotski, ambos defendían la idea de que del juego es de suma importancia en el aspecto pedagógico, definiendo “la construcción del conocimiento” dicho de otra manera, que el aprendizaje se manifiesta a medida que el aprendiz interactúa con su realidad y realiza actividades sobre ella.

Para Papert existe un intercambio y vínculo entre el sujeto activo y el medio. La computadora en este caso es el medio y Papert pensaba que esta podría ayudar en el desarrollo intelectual más que con otras tecnologías. Su hipótesis se basaba en que la computadora puede concretar y personalizar lo formal.

Entre los puntos más importantes del medio es que el alumno o alumna pueda disfrutar y experimentar con sus ideas.

### **6.12 Modelo**

Un modelo físico es la reproducción a escala reducida de las magnitudes más representativas de un sistema o elemento. Para diseñar el modelo de un sistema se debe empezar a partir de una predicción de su funcionamiento antes que el sistema pueda diseñarse a detalle. La predicción se basa en una descripción de las características dinámicas del sistema, a esta descripción se la llama modelo matemático y normalmente hace referencia a una serie de ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del sistema (modelo teórico) [22].

### **6.13 Sistema modular**

Carliss Young Baldwin [23] en su libro “Design Rules: The power of modularity” define el diseño modular es el diseño basado en la modulación reticular de espacios que permitan optimizar el tiempo de construcción.

Esto permitirá que los bloques sean transportables, desarmables y reorganizables para impulsar diferentes funcionalidades y puedan reutilizarse y generar un uso diferente al que fueron fabricados. En conclusión, un sistema modular se puede caracterizar por ser discretos módulos escalables y reutilizables.

## **7. Propuesta solución**

Por las razones mencionadas en la sección de Justificación y con un esfuerzo por fomentar la colaboración institucional y evitar que la educación se detenga, se desarrollará un proyecto centrado en los alumnos de ingeniería que incluya, análisis cinemático (análisis de posición, velocidad, aceleración) de mecanismos en 2D, visualización de un mecanismo en 3D; además de que permitirá al usuario realizar el armado un mecanismo físicamente con piezas LEGO® de distintas dimensiones para hacerlo modular (si es que se cuenta con ellas) y un Arduino, al mismo tiempo de la simulación, logrando así la implementación de un sistema.

## TRABAJO TERMINAL INGENIERÍA MECATRÓNICA

### 7.1 Definición de la metodología mecatrónica

La mecatrónica es una filosofía de integración sinérgica de distintas áreas de la ingeniería, las cuales tienen el propósito de simular, adaptar y optimizar proyectos para la mejora continua. Los fundamentos de la mecatrónica es la teoría de la optimización que hace referencia a resolver problemas complejos con el mayor ahorro posible en todos los sentidos, la teoría de sistemas y la ingeniería concurrente que se refiere al paralelismo, herramientas computacionales y el ciclo de vida de un proyecto.

La norma VDI 2206 describe procedimiento genérico para diseñar sistemas mecatrónicos. Los requisitos son considerados como el punto de partida, estos requisitos sirven para poder definir el sistema de manera precisa y al mismo tiempo forman la medida contra la cual el producto debe ser evaluado posteriormente. La parte izquierda de la V representa la parte de diseño donde se definen las especificaciones del sistema, a esta fase se le conoce como Diseño del sistema.

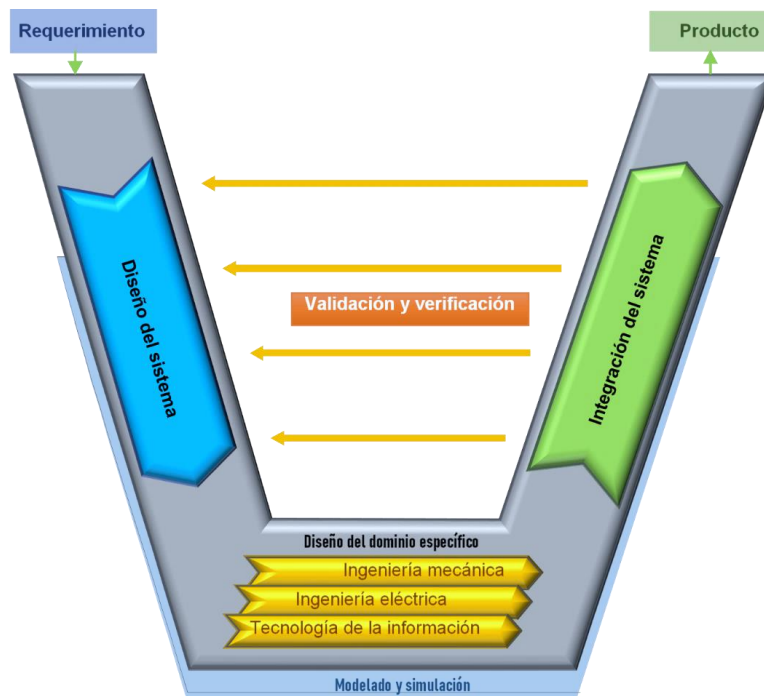


Figura 16. Modelo VDI-2206 [25]

La parte derecha de la V de la Figura 16, representa la parte del diseño mecatrónico donde se comprobará el sistema esto quiere decir que se validarán las etapas de la parte izquierda, en esta etapa se dará el desarrollo del software, hardware y la producción final.

La parte de debajo de la V, donde se encuentran ambas partes, representa la corriente de desarrollo, se le conoce como modelado y simulación y es donde entrarán todas las metodologías disciplinarias que se utilizarán para el desarrollo del proyecto.

El diseño del sistema, que es la parte que se trabajará en este protocolo, consiste principalmente de:



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA



Figura 17. Diseño del sistema

A continuación, se hará la identificación de las necesidades del sistema, se clasificarán en funcionales y no funcionales. Después con estas necesidades se construirán los requerimientos del sistema y se clasificarán igual que las necesidades, después se hará una matriz de trazabilidad para relacionar las necesidades y requerimientos planteados. Se plantearán las funciones del sistema con ayuda del diagrama FBS y se hará con ayuda del diagrama IDEF-0 la interconexión de funciones, también se hará el desarrollo de la arquitectura física y se presentará la solución. Al finalizar se traducirá en un documento (hito o entregable).

## 7.2 Desarrollo de la propuesta solución

### 7.2.1 Necesidades y requerimientos

En la Tabla 3. Necesidades, se presentan las necesidades del sistema, las cuales especifican lo que el sistema debe de realizar de manera ambigua. Se clasificaron en funcionales y no funcionales.

Tabla 3. Necesidades

NO.	NECESIDAD	CLASIFICACIÓN
1	Comprensible para el usuario	Funcional
2	Bloques modulares adecuados a medidas estándar de las piezas LEGO	Funcional
3	Interactivo	Funcional
4	Soporte de par del motor	Funcional
5	Que el mecanismo pueda construirse con bloques didácticos	Funcional
6	Que la interfaz calcule y muestre la cinemática del mecanismo construido	Funcional
7	Acoplamiento de motor con mecanismo	Funcional
8	Comunicación con el sistema físico	Funcional
9	Accesible en costo	No funcional
10	Material de uso rudo	No funcional
11	Interfaz atractiva	No funcional
12	Posibilidad de expansión modular	Funcional
13	Facilidad de configuración de la interfaz	No funcional
14	Software de fácil instalación	No funcional
15	Software de fácil acceso para estudiantes	No funcional
16	Interfaz intuitiva	Funcional





**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

En la Tabla 4. Requerimientos, se presentan los requerimientos del sistema, clasificadas en funcionales y no funcionales.

*Tabla 4. Requerimientos*

NO.	REQUERIMIENTO	VALOR	CLASIFICACIÓN
R1	Nivel de conocimiento: estudiantes de ingeniería	Licenciatura y/o posgrado: Electromecánica, Mecánica, Control Y Automatización, Robótica Industrial, Mecatrónica.	Funcional
R2	Modos de operación	1	Funcional
R3	Lenguaje de programación	Visual-gráfico	Funcional
R4	Número de piezas a diseñar	≥ 5 piezas	Funcional
R5	Ejercicios	9 mecanismos Virtuales 1 Físico	Funcional
R6	Selección de velocidades de motor físico	0 rpm – 50 rpm	Funcional
R7	Bloques didácticos totales	20	Funcional
R8	Desarrollo de ecuaciones cinemáticas	Posición, Velocidad y Aceleración	Funcional
R9	Espacio del mecanismo	Tamaño máximo 40 cm	Funcional
R10	Tarjetas de desarrollo accesible	<\$600	No funcional
R11	Costo del proyecto total	< \$10000	No funcional
R12	Rigidez del material	E ≈ 1.7 a 2.8 GPa	No funcional
R13	Simulación	3D	No funcional
R14	Costo del software	\$0- Versión estudiantil	No funcional
R15	Sistema operativo	Windows	Funcional
R16	Ventanas del software	1	Funcional
R17	Tamaño máximo de base	40 x60 cm	No funcional
R18	Manufacturar piezas de ensamble múltiple	Modular	Funcional
R19	Grados para giro del motor	360	Funcional

### 7.2.2 Matriz de trazabilidad

A continuación, se desarrollará la matriz de trazabilidad (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). La matriz de trazabilidad relacionará los requisitos y las especificaciones en que se traducen dichos requisitos, esto con el fin de asegurar el cumplimiento de los requisitos validados y mantener al día el estado de los requisitos del proyecto, ya que este estado puede cambiar con el tiempo.



## TRABAJO TERMINAL INGENIERÍA MECATRÓNICA

*Tabla 5. Matriz de trazabilidad*

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19
N1	✓	✓	✓					✓											
N2				✓	✓		✓												✓
N3						✓													
N4				✓			✓												
N5								✓											
N6	✓							✓											
N7																			✓
N8										✓									
N9										✓	✓			✓					
N10												✓							
N11													✓					✓	
N12																			✓
N13																		✓	
N14															✓				
N15															✓				
N16																			✓

### 7.2.3 Arquitectura funcional

#### F0. Construir física y virtualmente mecanismos

##### F1. Gestionar energía

##### F1.1 Acondicionar energía

##### F1.1.1 Acondicionar señales de los sensores

##### F1.2 Distribuir energía

##### F2. Comunicar

##### F2.1. Comunicar al software con el usuario

##### F2.2. Comunicar software con el mecanismo

##### F2.3. Comunicar señales de los sensores del mecanismo

##### F3. Generar movimiento

##### F3.1. Generar movimiento en el mecanismo virtual

##### F3.2. Generar movimiento en el mecanismo físico

##### F4. Administrar información

##### F4.1. Mostrar información

##### F4.2. Organizar información

##### F4.3. Procesar información de los sensores

##### F5. Modelar



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



- F5.1.** Obtener modelado cinemático del mecanismo
- F6.** Programar tarjeta
  - F6.1.** Vincular programa y tarjeta
  - F6.2.** Compilar programa en la tarjeta
- F7.** Soportar y Proteger
  - F7.1.** Soportar mecanismo
  - F7.2.** Proteger mecanismo
- F8.** Construir mecanismo
  - F8.1.** Construir mecanismo físico
  - F8.2.** Construir mecanismo virtual
- F9.** Medición de parámetros
  - F9.1.** Medición de distancia de corredera
- F10.** Verificar
  - F10.1.** Verificar conexión tarjeta con mecanismo
  - F10.2.** Verificar conexión de los sensores
  - F10.3.** Verificar compilación
- F11.** Interactuar con el usuario
  - F11.1** Obtener valores de velocidad del motor
  - F11.2.** Operación de velocidad del motor virtual
  - F11.3.** Operación de velocidad del motor físico

Ya que se realizaron las funciones del sistema es necesario representarlas mediante un modelo FBS (Figura 18), este modelo es de gran ayuda ya que permite visualizar la interrelación entre las funciones con lo cual se ayuda a comprender la evolución del proceso del diseño mecatrónico.



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

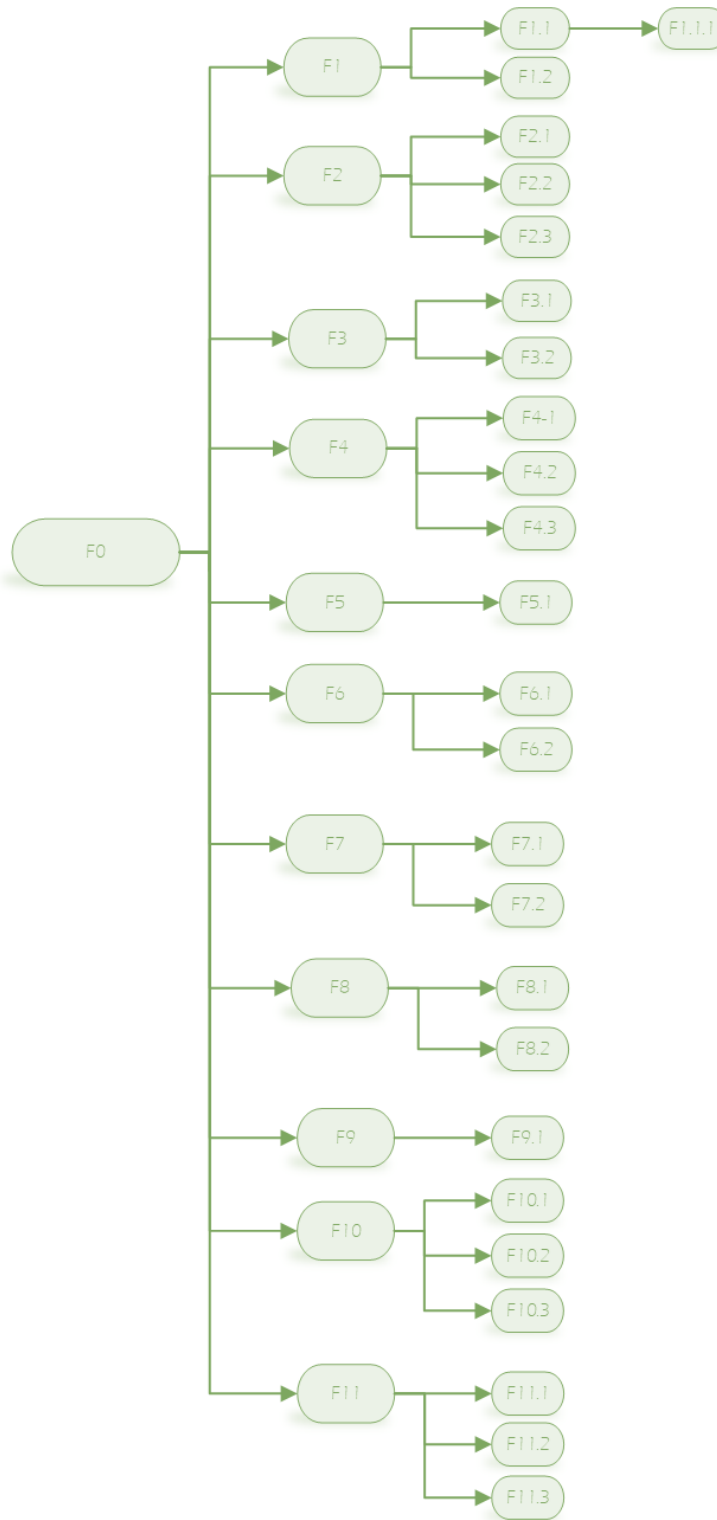


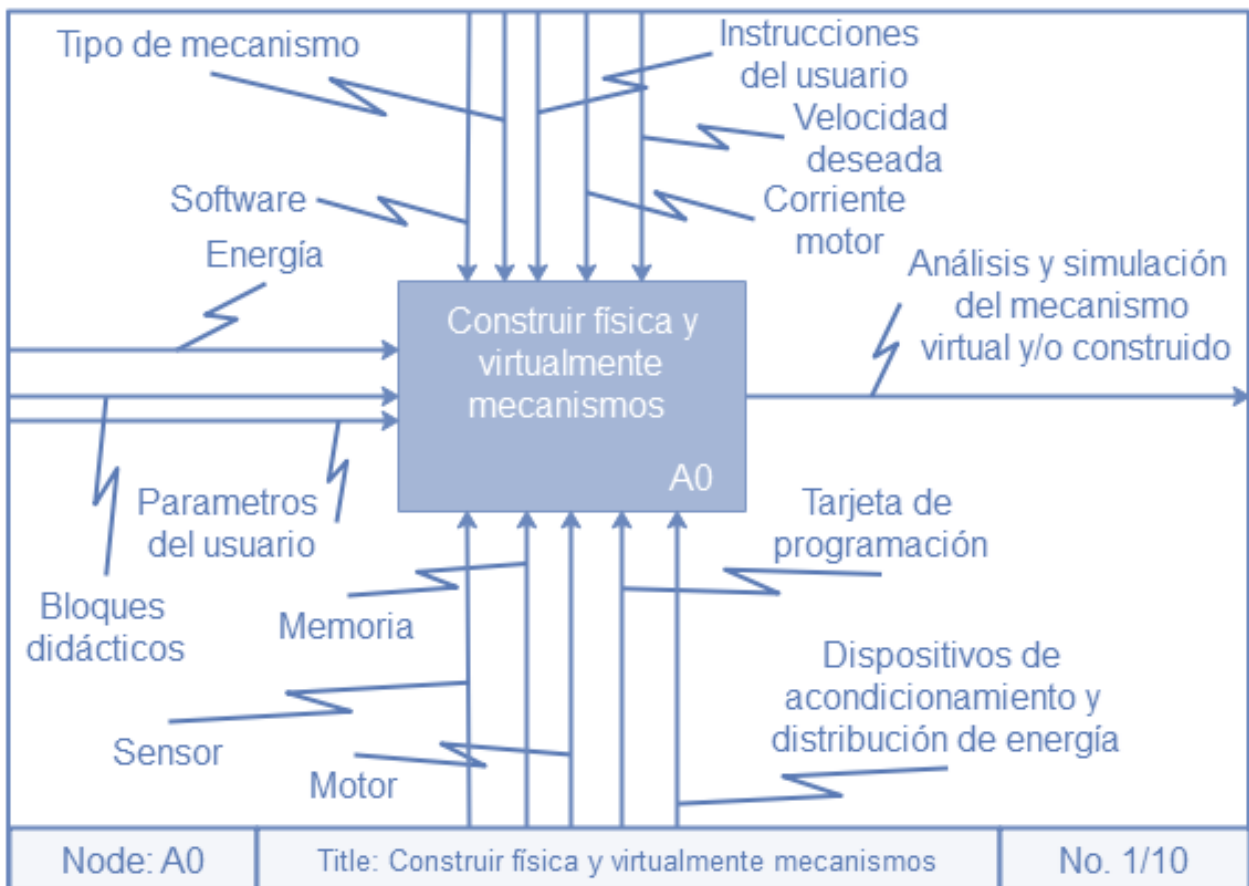
Figura 18. Diagrama FBS

**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**7.2.4 Modelado de la interconexión de funciones IDEF-0**

En esta sección se desarrollará el modelo de interconexión entre funciones de acuerdo con el estándar IDEF-0, este consiste en una serie de normas que definen la metodología para representar de manera estructurada y jerárquica las funciones que conforman un sistema.

En la Figura 19 se muestra el IDEF-0 de la función principal F0. Las flechas representarán las entradas, control, herramientas y salidas del sistema, dentro de las funciones se desarrollará más a fondo la interconexión de las funciones de segundo nivel expuestas en el diagrama FBS de la Figura 21. Las flechas de la parte de arriba corresponden a la parte de control, las de abajo serán las herramientas; las flechas que entran por la izquierda son entradas y las de la derecha salidas, en el cual se observa que se tiene el análisis del mecanismo con su modelo matemático y si se arma, el mecanismo armado funcionando.



*Figura 19. IDEF-0 A0*

En la Figura 23 se mostrará el diagrama F0 de todas las funciones de segundo nivel que conforman a A0. Cada una tendrá sus entradas, salidas, control y herramientas e irán conectándose entre ellas para que el sistema funcione.





TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

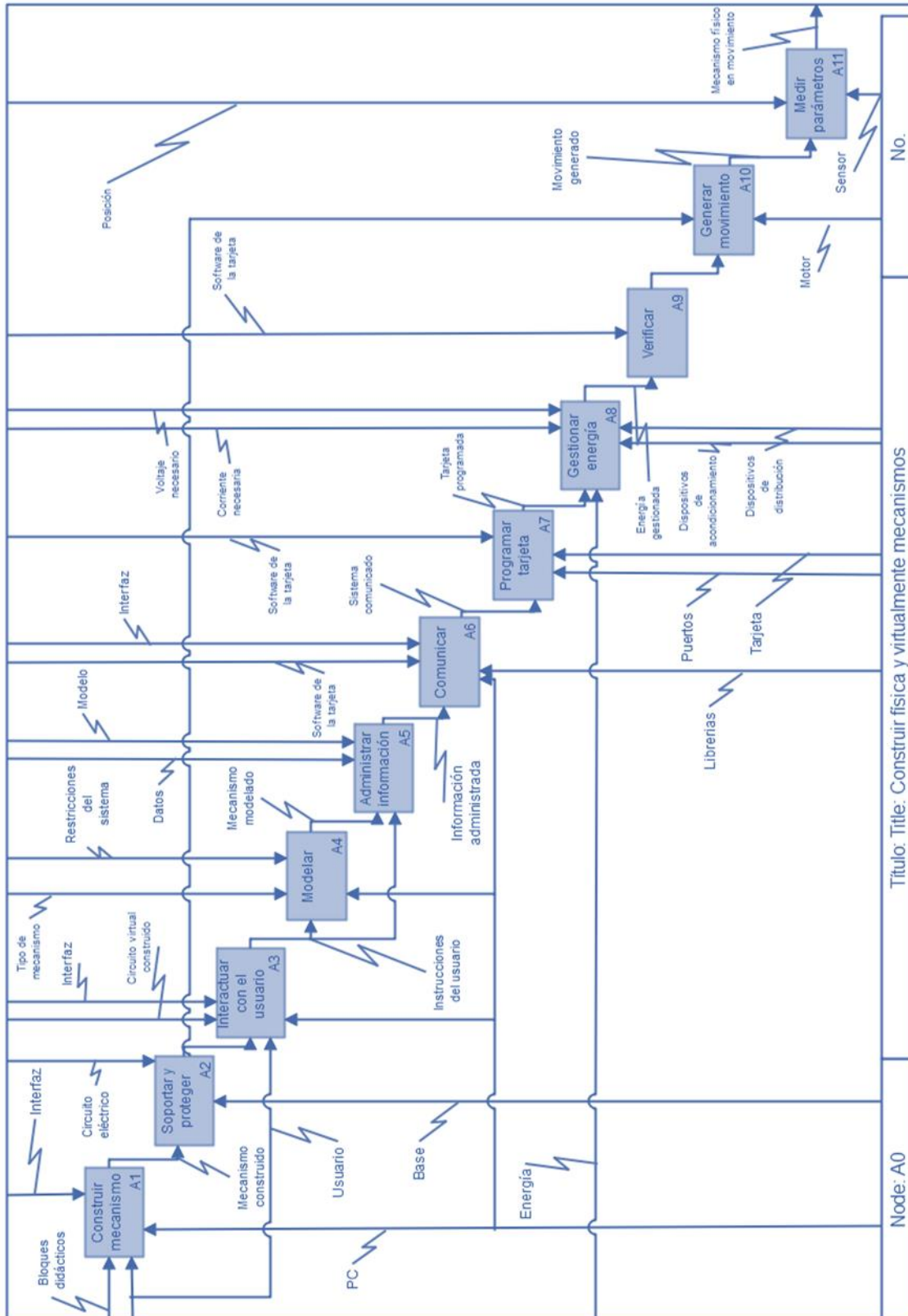


Figura 20. Diagrama IDEF-0 Expandido



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

### 7.2.5 Arquitectura física del sistema mecatrónico

Para identificar lo que conforma la arquitectura física del sistema mecatrónico la pregunta es si se debe diseñar o seleccionar un componente. Para esto es de gran apoyo de la arquitectura funcional que se planteó con anterioridad.

Se crearon módulos que conformarán el sistema. Estos módulos se enlistan a continuación:

M1 Módulo Interacción con el usuario.

M2 Módulo de construcción virtual del mecanismo.

M3 Módulo de procesamiento central.

M4 Módulo de graficación.

M5 Módulo de envío de señales para operación del motor.

M6 Módulo de programación y compilación de la tarjeta.

M7 Módulo de verificación.

M8 Módulo de ensamble físico de mecanismo.

M9 Módulo de medición de parámetros.

M10 Módulo energético.

M11 Módulo de soporte y protección

Posteriormente estos módulos deben unificarse para que puedan trabajar en conjunto y así crear un sistema. En este caso se han definido cuatro, los cuales son:

S1 Sistema central de procesamiento de datos.

S2 Sistema de comunicación.

S3 Sistema estructural.

S4 Sistema de hardware.



Con esta jerarquía se hace un diagrama de bloques que represente la relación entre módulos y sistemas y que indique al mismo tiempo la transformación de energía, materia e información.

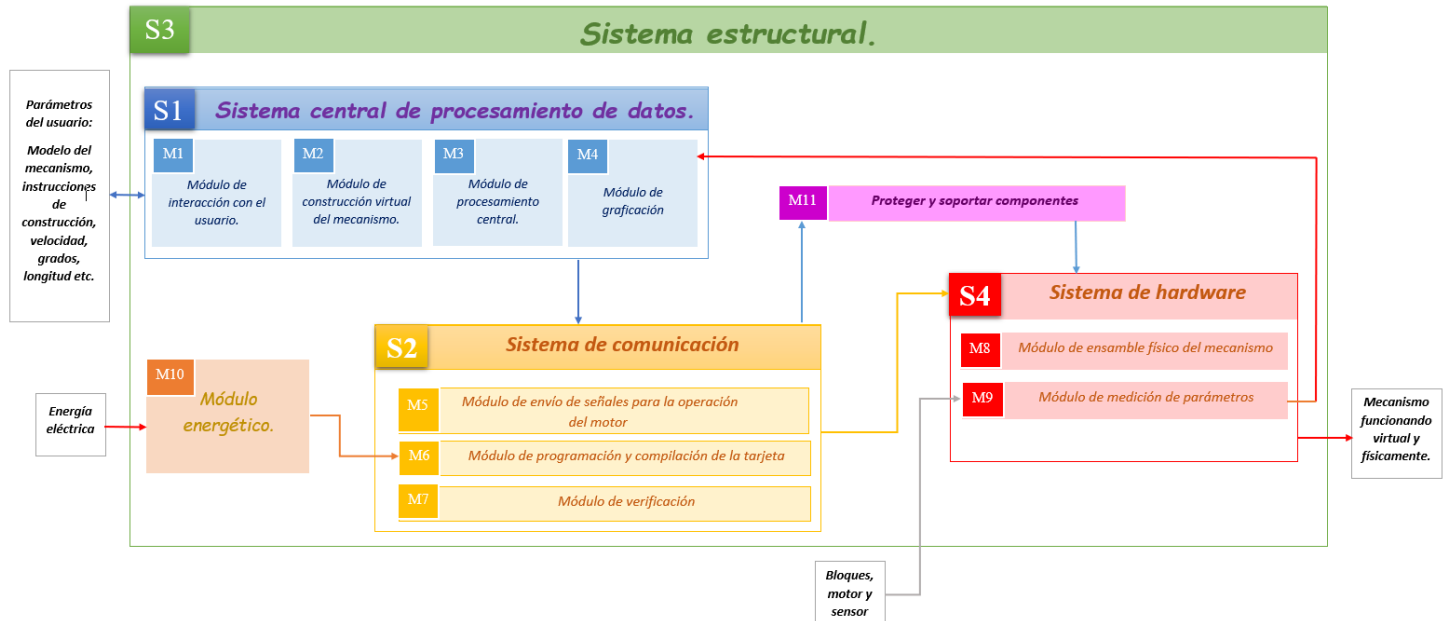


Figura 24. Sistemas y módulos.

Las líneas azules representan la transformación de información, las negras, dispositivos y las naranjas de energía.

### S1. Sistema central de procesamiento de datos.

Este sistema es el encargado de recibir las entradas del usuario y transformarlas en instrucciones, con el propósito de modelar el mecanismo para posteriormente plantear su modelo matemático teniendo como salida de este sistema el mecanismo modelado en 3D además de su descripción matemática.

Este sistema integrará a los módulos: M1, M2 y M3, los cuales serán descritos a continuación

#### M1. Módulo de interacción con el usuario.

Este módulo es el encargado de transformar las entradas del usuario en instrucciones para la interfaz. Teniendo en cuenta que se tiene planeado realizarlo mediante Matlab App Designer entonces es importante recalcar que es un entorno interactivo para diseñar una aplicación y programar su comportamiento. La interacción con el usuario se puede llevar a cabo mediante el administrador de diseño de ventanas para organizar la interfaz del usuario y las opciones de reordenación automáticas para hacer que la aplicación detecte y responda a los cambios, permite distribuir apps empaquetándolas en los archivos del instalador directamente desde la barra de herramientas de App Designer, o bien creando una aplicación web o de escritorio independiente (se requiere MATLAB Compiler).



## TRABAJO TERMINAL INGENIERÍA MECATRÓNICA

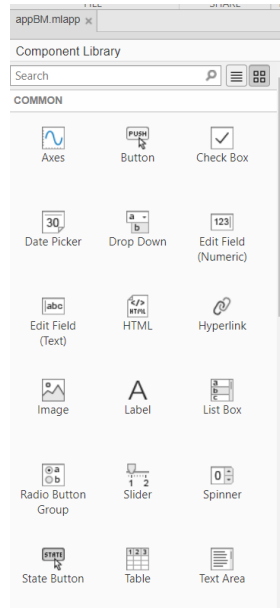


Figura 25. Control numérico App Designer. [26]

### M2. Módulo de construcción virtual.

En este módulo se realizará la construcción virtual del mecanismo en un ambiente de 3D implementando su modelo matemático de igual forma. La construcción 3D de cada uno de los bloques necesarios será mediante SolidWorks, este mismo software permitirá verificar los cálculos de esfuerzos que se realizarán durante el semestre en el que se cursará Trabajo Terminal 1.

En este proyecto como se ha mencionado se tiene contemplado el uso de SolidWorks para crear modelos 3D, Matlab para crear perfiles de movimiento en el modelo 3D mediante el bloque VRsink de Matlab Simulink buscando generar movimiento en modelos 3D.

### M3. Módulo de procesamiento central

Es el módulo encargado de procesar la información para mostrarla en la interfaz de regreso al usuario y a la tarjeta. Con el uso de Matlab será posible la adquisición de datos, análisis de datos y presentación de resultados.

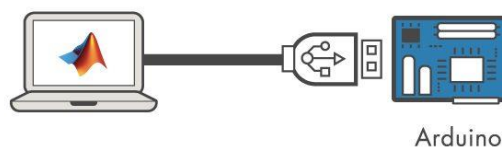


Figura 26. Matlab y Arduino

[27]



#### **M4. Módulo de graficación**

El módulo de graficación permitirá graficar la posición de la corredera del mecanismo físico y la posición del mecanismo virtual, lo que permitirá al usuario observar la diferencia de resultados.

#### **S2. Sistema de comunicación**

Este sistema es el encargado de crear la comunicación física y virtual entre usuario, tarjeta e interfaz mediante la programación de la tarjeta ligada a la interfaz para energizarla e indicarle las instrucciones correspondientes para generar una señal de salida. Éste contiene a los módulos: M4 y M5 los cuales serán descritos a continuación.

#### **M5. Módulo de programación y compilación de la tarjeta.**

En este módulo se pretende programar la tarjeta para hacerla compatible con la interfaz logrando que esta cree un vínculo con la tarjeta para poder generar una compatibilidad y obtener una señal de salida.

Para esto deben ser instaladas las herramientas que se necesitan para la programación y compilación de los programas, en este caso será el software IDE Arduino. El paquete de soporte de MATLAB para Arduino permite escribir programas .m que leen y escriben datos en los dispositivos Arduino; ya que este es un lenguaje interpretado de alto nivel, la programación resulta más fácil que con otros lenguajes compilados, de forma que se pueden ver resultados de las instrucciones de E/S inmediatamente, sin necesidad de compilación. MATLAB incluye una lista increíble de funciones matemáticas, de ingeniería y muchas más que se integran y permiten analizar y visualizar los datos recopilados por sensores y dispositivos como Arduino.

#### **M6. Módulo de envío de señales para operación de motor**

Este módulo es el encargado de mandar las instrucciones (parámetros de entrada) para permitir el movimiento del mecanismo. Para cumplir con esto, se pretende diseñar un programa en Matlab en donde el usuario pueda seleccionar e indicar los parámetros para mover el servomotor. Por esta razón será necesario el uso e implementación de una modulación por ancho de pulso PWM el movimiento será permitido hasta 360°. Será el puente entre el software y el mecanismo construido físicamente acoplándose para lograr una perfecta comunicación entre tarjeta y mecanismo.

#### **S3. Sistema estructural.**

Este sistema abarca S1, S2, y M9 ya que es el encargado de manipular de forma general las instrucciones del usuario para transformarlas en un mecanismo virtual además de entregar una señal de salida para ser aplicada en el mecanismo físico.

#### **M9. Módulo energético.**

Este módulo tiene la tarea de suministrar la energía al motor para implementar físicamente el mecanismo mediante circuitos adaptados a la tarjeta para entregar el voltaje requerido. La placa Arduino UNO entrega



voltajes de 3.3 V, y 5 V y efectivamente es el voltaje necesario para encender un motor que se alimenta a 5 V, sin embargo, Arduino puede suministrar 20 mA de corriente a través de cada puerto de salida, y cada uno, incluso el motor eléctrico más pequeño disponible en el mercado, requiere de 10 a 1000 veces más para funcionar correctamente, por lo que al conectar un motor eléctrico a la placa Arduino, la conexión no debe hacerse directamente, ya que puede quemar del puerto de salida Arduino.

Para saber qué dispositivos eléctricos se requieren es necesario primero conocer el tipo de motor que se usará, ya que dependiendo de sus características serán las condiciones por tomar en cuenta para comparar y seleccionar la opción más viable que solucione las funciones de este módulo. Para poder seleccionarlo entonces deberán hacerse vectores de ponderación de criterios y matrices de multicriterio AHP para así obtener el motor más factible para la aplicación y con eso también encontrar la solución más viable para el motor siguiendo el mismo procedimiento de selección AHP.

#### **S4. Sistema de construcción física.**

Este sistema permitirá realizar la construcción física del mecanismo biela manivela-descentrada, esta construcción será realizada mediante el acople del motor al mecanismo y la entrada de la señal de la tarjeta. Para evitar restricciones se piensa elevar el motor para que el mecanismo tenga libertad de movimiento, asegurando que el motor gire 360°. Para esto, deberá diseñarse y manufacturarse los bloques y acoplamientos necesarios para la sujeción de motor.

#### **M7. Módulo de ensamble físico del mecanismo.**

Este módulo pretende que el usuario arme con los bloques proporcionados el modelo del mecanismo biela manivela corredera. Para esto será necesario diseñar las juntas que unirán cada uno de los eslabones que se diseñen, además del acoplamiento del motor, todas estas piezas que serán parte importante de este módulo deben validarse mediante cálculos y simulaciones de análisis de esfuerzos de cada una de las piezas a ensamblar.

#### **M8. Módulo de medición de parámetros**

Se obtendrá la posición de la corredera del mecanismo de biela manivela, este dato tendrá que ser enviado a Matlab para su graficación.

Analizando se plantearon diferentes alternativas para darle solución a los requerimientos y funciones descritos con anterioridad. Todas estas alternativas se proponen en una matriz que tiene el propósito de incorporar las opciones o ideas contempladas para la construcción de los mecanismos abarcando la arquitectura funcional del proyecto con los siguientes criterios divididos en sistemas, módulos, funciones y característica, estas últimas creadas a partir de las funciones descritas en la Figura 21.





## TRABAJO TERMINAL INGENIERÍA MECATRÓNICA

Tabla 6. Matriz morfológica

SISTEMA	MÓDULO	FUNCIÓN	CARACTERÍSTICA	POSIBLES SOLUCIONES			
				Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4
S1	M1	F7.1. Obtener valores de velocidad del motor por parte	C7.1.1. Tipo de comunicación	Controles	Panel de botones		
	M2	F9.2. Construir mecanismo virtual.	C9.2.1. Forma de los eslabones		Combinación entre 6 y 4		
			C9.2.2. Forma de las juntas				
			C9.2.4. Forma de la biela	Cuadrada	Bordes redondos	Circular	
M3	F4.3. Obtener información	C.4.3.1. Tipo de comunicación	Guardar datos en archivo de texto	Guardar datos en un arreglo	Guardar datos en un arreglo son "for"	Buetooth	
S2	M5	F11.2. Operación del motor	Tipo de herramienta	Física	Control programado	Ambos	
		F2.2. Comunicar software con el mecanismo	C.2.2.1. Tipo de comunicación	Módulo de bluetooth	Cable	WIFI	
	M7	F6.3. Verificar compilación	C.6.3.1. Forma de verificación	Mediante aviso	Botón virtual	Ventana emergernte con mensaje de error	Ventana emergernte con mensaje de aprobación
		F2.6. Verificar conexión tarjeta con mecanismo	C.2.6.1. Forma de verificación	Mediante aviso	Botón virtual	Ventana emergernte con mensaje de error	Ventana emergernte con mensaje de aprobación
		F2.7. Verificar conexión del sensor	C.2.7.1. Forma de verificación	mediante aviso	Botón virtual	Ventana emergernte con mensaje de error	Ventana emergernte con mensaje de aprobación
S4	M8	F9.1. Construir mecanismo físico	C9.2.1. Forma de los eslabones		Combinación entre 6 y 4		
			C9.2.1. Forma de las juntas				
	M9	F11.1. Medición de distancia de corredera	C11.1 Tipo de sensor	Ultrasonico	Transformador lineal diferencial variable	Infrarrojo	Encoder lineal
			C11.2 Ubicación de sensor	En el motor	Debajo del motor	Guía de la corredera	
M11		F2.6. Soportar mecanismo	C2.6.1 Forma de soporte para el mecanismo	Trapezio			
			C2.6.1 Forma de protección del mecanismo	En el motor	Elevación de la base	Piezas de seguridad	
		F2.7. Proteger mecanismo	C2.6.1 Tipo de protección para circuito electrico	Diodo en la etapa de potencia	Arreglo de resistencias y capacitores	Fusible	

Como se puede apreciar en la matriz morfológica se seleccionaron 3 rutas comenzando por la ruta verde, la cual propone que el mecanismo sea actuado por un sistema neumático (válvulas, mangueras, actuadores), una base de forma rígida y desmontable además de vigas tipo lego con articulaciones de agarre en la parte superior y lateral. En la Figura 24 podrá verse el sistema propuesto 1.



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

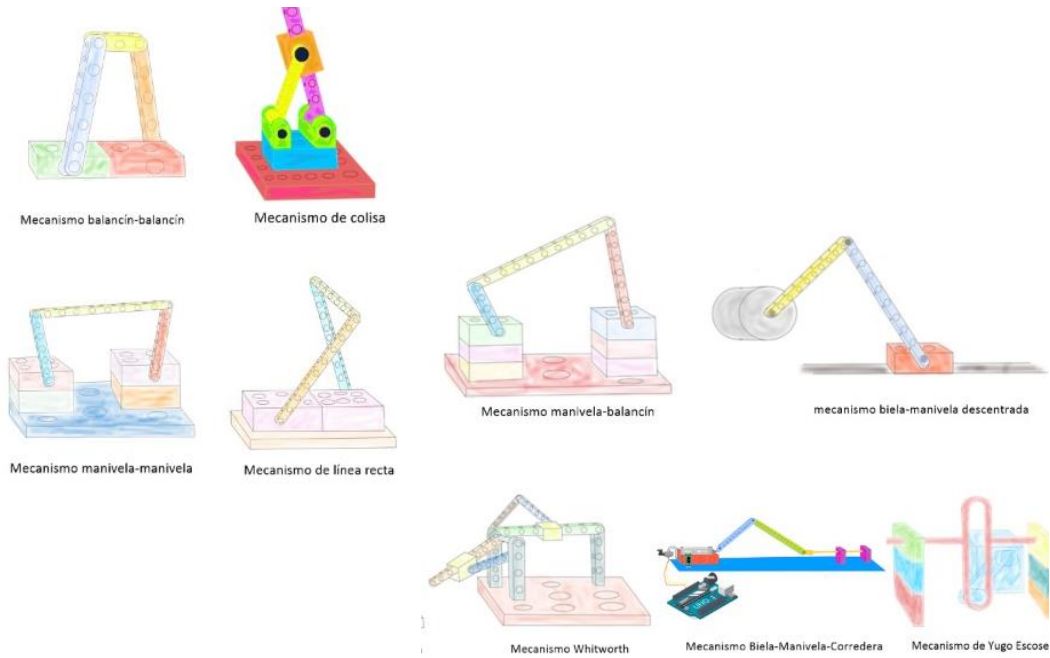


Figura 27. Boceto Sistema 1

La siguiente opción es la ruta amarilla, esta ruta muestra la construcción de mecanismos partiendo de pernos diseñados específicamente para las vigas tipo bloque didáctico, una base elevada de forma cuadrada, forma de actuación por medio de un motor además de incluir conexión con la interfaz mediante Arduino y bluetooth con un módulo externo para la manipulación de velocidad. En la Figura 28 podrá verse el sistema propuesto 2.

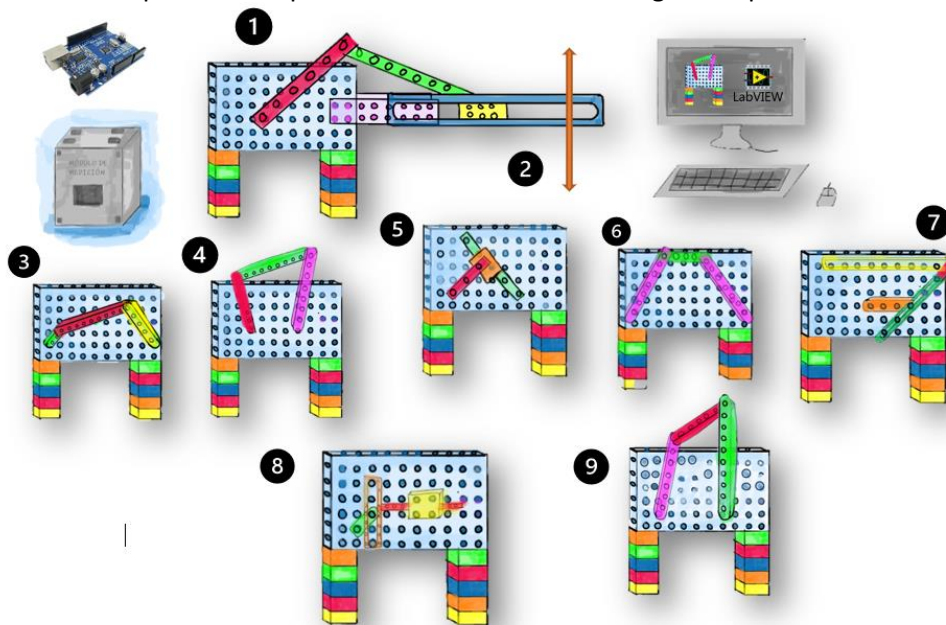


Figura 28. Boceto sistema 2



## TRABAJO TERMINAL INGENIERÍA MECATRÓNICA

Por último, se tiene la opción color roja, la cual presenta de forma similar a las demás con una base de tipo trapezoidal, mismos bloques y vigas que en la opción amarilla y motor neumático para actuar el mecanismo de igual manera se creará una conexión mediante Arduino. En la Figura 29 podrá verse el sistema propuesto 3.

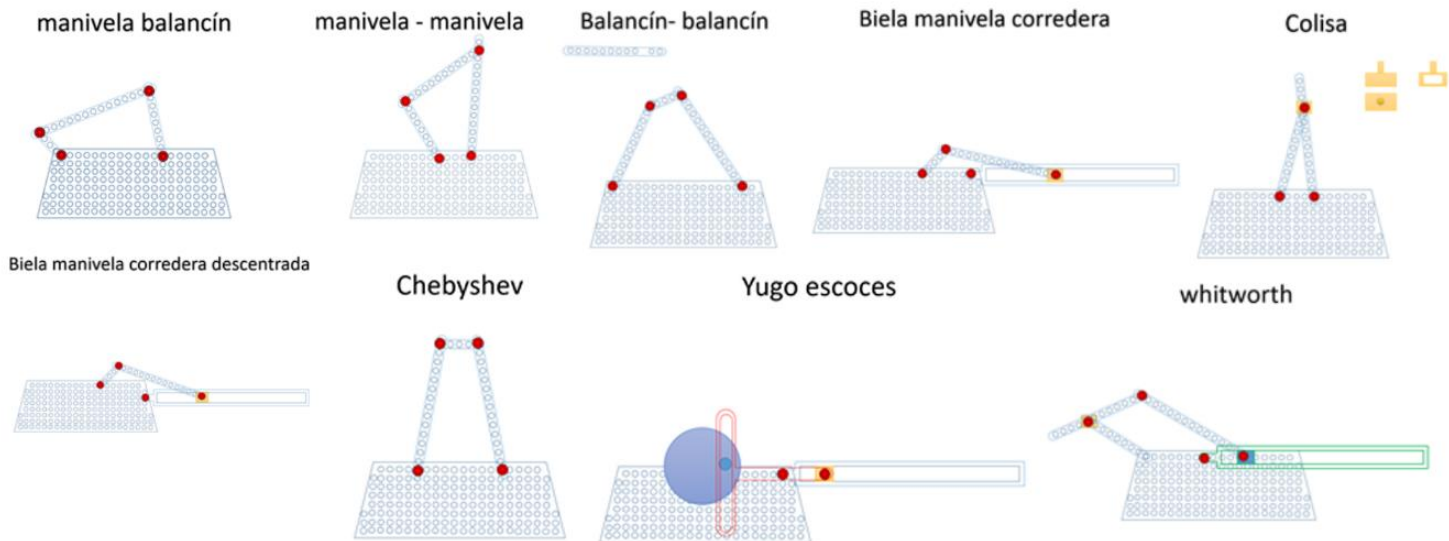


Figura 26. Boceto sistema 3

Después de tener los sistemas definidos, por cada característica se plantearon criterios de selección que permitieran evaluar los 3 sistemas mediante comparación. Estos criterios se muestran en la Tabla 7:

Tabla 7. Criterios por función y característica

FUNCIÓN	CARACTERÍSTICA	CRITERIOS			
F7.1. Obtener valores de velocidad del motor deseada	C7.1.1. Tipo de comunicación	Facilidad de uso de los comandos			
F2.1. Comunicar al software con el usuario	C2.1.1. Tipo de comunicación	Facilidad de uso del software	Soporte del software	Costo del software	Visualización gráfica
F9.2. Construir mecanismo virtual.	C9.2.1. Forma de los eslabones	Facilidad de manufactura	Capacidad Modular		
	C9.2.1. Forma de las juntas	Facilidad de ensamble			
F9.1. Construir mecanismo físico	C9.2.1. Forma de los eslabones	Facilidad de ensamble			
F32. Generar movimiento en el mecanismo físico	C32.1 Tipo de accionamiento	Consumo de energía			
F11.1. Medición de distancia de corredera	C11.1 Tipo de sensor	Consumo de energía	Bajo precio		
F1.2 Distribuir energía	C1.1.1 Forma de distribución	Complejidad del sistema	Consumo de energía		
F11.2. Operación del motor	Operación del motor	Facilidad de manipulación de señal	Costo de la herramienta de operación del motor		
F2.7. Proteger mecanismo	C2.6.1 Forma de protección del mecanismo	Capacidad modular de los elementos de soporte			



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



Después de homologar los criterios se definieron como finales los que se muestran en la Tabla 8:

*Tabla 8. Criterios de evaluación finales*

No.	Criterio
1	Facilidad de uso de los comandos
2	Facilidad de uso del software
3	Soporte del software
4	Costo del software
5	Visualización gráfica
6	Facilidad de manufactura
7	Capacidad modular eslabones
8	Facilidad de ensamble
9	Bajo precio del sensor
10	Consumo de energía
11	Precisión del método numérico
12	Facilidad de manipulación de señal para operación del motor
13	Costo de la herramienta de operación del motor
14	Capacidad modular de los elementos de soporte

A continuación, estos criterios serán evaluados por medio de la metodología multicriterio AHP, obteniendo así dos matrices, una llamada matriz de prioridad de criterios que es presentada en la Tabla 9 y otra conocida como matriz normalizada presentada en la Tabla 9.

La primera matriz se fue relleno de acuerdo con la ponderación de Saaty que se encuentra en la referencia [29] sin embargo para simplificar se tomaron solo 5 niveles de ponderación, ya que los nueve niveles de comparación pueden hacer que se confundan los niveles bajos y altos ocasionando que las ponderaciones de las matrices no sean las adecuadas. Según Saaty [30] esta metodología sirve para analizar aproximadamente 8 criterios, pero para ingeniería se definen tantos criterios como sean necesarios para definir la solución, así que reducir la escala ayudará también a simplificar las decisiones de ponderaciones en la matriz; es por esto por lo que de los nueve niveles mostrados anteriormente solo quedarán:



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



Importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen igualmente al objetivo
2	Débil o leve	
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre otra
4	Mas moderado	
5	Gran importancia	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra
6	Mas importante	
7	Muy fuerte o importancia demostrada	Una actividad es muy favorecida sobre otra; su dominio demostrado en la práctica
8	Muy, muy importante	
9	Extrema importancia	La evidencia que favorece una actividad sobre otra es de la más alta posible orden de afirmación
<b>Recíprocos de arriba</b>	Si la actividad tiene uno de los números de arriba distintos de cero asignado cuando en comparación con la actividad j, entonces j tiene el recíproco valor en comparación con i	Una suposición razonable
<b>Racionales</b>	Relaciones derivadas de la escala	Si se forzara la consistencia obteniendo n valores numéricos para abarcar la matriz

a)



Importancia	Definición
1	Igual importancia
2	Intermedio
3	Un poco mas importante
4	Intermedio
5	De mayor importancia

b)

Figura 29. Niveles de ponderación Saaty a) Nueve niveles b) Cinco niveles

La primera matriz, será una matriz de ponderación de criterios y servirá para evaluar la importancia de los criterios definidos en la Tabla 8.



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

*Tabla 9. Matriz de ponderación de criterios.*

Cr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Cr1	1	1/5	1/5	1/4	1/5	2	1/5	1/5	1/5	3	3	1/5	1/4	1/5
Cr2	5	1	1/4	1/5	4	3	1/5	1/4	3	5	4	1	2	1/4
Cr3	5	4	1	2	5	3	1/5	4	2	3	4	1	1/2	3
Cr4	4	5	1/2	1	5	4	1	4	1/4	1/2	1/2	1/5	1/5	1/3
Cr5	5	1/4	1/5	1/5	1	4	1/5	1/5	3	4	4	3	1/3	1/4
Cr6	1/2	1/3	1/3	1/4	1/4	1	2	2	3	3	1/5	1/3	3	2
Cr7	5	5	5	1	5	1/2	1	5	4	5	4	5	5	2
Cr8	5	4	1/4	1/4	5	1/2	1/5	1	5	5	4	5	5	2
Cr9	5	1/3	1/2	4	1/3	1/3	1/4	1/5	1	5	5	1	1/3	1/3
Cr10	1/3	1/5	1/3	2	1/4	1/3	1/5	1/5	1/5	1	4	4	1/2	1/3
Cr11	1/3	1/4	1/4	2	1/4	5	1/4	1/4	1/5	1/4	1	1/3	1/4	1
Cr12	5	1	1	5	1/3	3	1/5	1/5	1	1/4	3	1	1/3	1/2
Cr13	4	1/2	2	5	3	1/3	1/5	1/5	3	2	4	3	1	1/3
Cr14	5	4	1/3	3	4	1/2	1/2	1/2	3	3	1	2	3	1
Sy	50.17	26.07	12.15	26.2	33.62	27.50	6.60	18.20	28.85	40.00	41.70	27.07	21.70	13.533

**MATRIZ DE COMPARACIÓN DE CRITERIOS**

Con esta matriz se calculará una nueva matriz normalizada:

*Tabla 10. Matriz de ponderación de criterios normalizada.*

<b>MATRIZ NORMALIZADA</b>														
Cr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0.01993	0.00767	0.01646	0.00956	0.00595	0.07273	0.03030	0.01099	0.00693	0.07500	0.07194	0.00739	0.01152	0.01478
2	0.09967	0.03836	0.02058	0.00765	0.11899	0.10909	0.03030	0.01374	0.10399	0.12500	0.09592	0.03695	0.09217	0.01847
3	0.09967	0.15345	0.08230	0.07648	0.14874	0.10909	0.03030	0.21978	0.06932	0.07500	0.09592	0.03695	0.02304	0.22167
4	0.07973	0.19182	0.04115	0.03824	0.14874	0.14545	0.15152	0.21978	0.00867	0.01250	0.01199	0.00739	0.00922	0.02463
5	0.09967	0.00959	0.01646	0.00765	0.02975	0.14545	0.03030	0.01099	0.10399	0.10000	0.09592	0.11084	0.01536	0.01847
6	0.00997	0.01279	0.02743	0.00956	0.00744	0.03636	0.30303	0.10989	0.10399	0.07500	0.00480	0.01232	0.13825	0.14778
7	0.09967	0.19182	0.41152	0.03824	0.14874	0.01818	0.15152	0.27473	0.13865	0.12500	0.09592	0.18473	0.23041	0.14778
8	0.09967	0.15345	0.02058	0.00956	0.14874	0.01818	0.03030	0.05495	0.17331	0.12500	0.09592	0.18473	0.23041	0.14778
9	0.09967	0.01279	0.04115	0.15296	0.00992	0.01212	0.03788	0.01099	0.03466	0.12500	0.11990	0.03695	0.01536	0.02463
10	0.00664	0.00767	0.02743	0.07648	0.00744	0.01212	0.03030	0.01099	0.00693	0.02500	0.09592	0.14778	0.02304	0.02463
11	0.00664	0.00959	0.02058	0.07648	0.00744	0.18182	0.03788	0.01374	0.00693	0.00625	0.02398	0.01232	0.01152	0.07389
12	0.09967	0.03836	0.08230	0.19120	0.00992	0.10909	0.03030	0.01099	0.03466	0.00625	0.07194	0.03695	0.01536	0.03695
13	0.07973	0.01918	0.16461	0.19120	0.08924	0.01212	0.03030	0.01099	0.10399	0.05000	0.09592	0.11084	0.04608	0.02463
14	0.09967	0.15345	0.02743	0.11472	0.11899	0.01818	0.07576	0.02747	0.10399	0.07500	0.02398	0.07389	0.13825	0.07389
SY	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Así podrá obtenerse la sumatoria de cada fila de la matriz, el cual tendrá que dividirse entre el número de criterios para conocer le ponderación de cada uno de ellos.

Tabla 11. Ponderación de criterios

$\Sigma x$	Criterio
0.361159	Facilidad de uso de los comandos
0.910868	Facilidad de uso del software
1.441726	Soporte del software
1.090821	Costo del software
0.794442	Visualización gráfica
0.998600	Facilidad de manufactura
2.256904	Capacidad modular eslabones
1.492583	Facilidad de ensamble
0.733980	Bajo precio del sensor
0.502395	Consumo de energía
0.489054	Precisión del método numérico
0.773946	Facilidad de manipulación de señal para operación del motor
1.028844	Costo de la herramienta de operación del motor
1.124678	Capacidad modular de los elementos de soporte

Tabla 12. Vector de ponderación

$V_{Cr} =$	0.025797082	Cr1
	0.065062005	Cr2
	0.102980446	Cr3
	0.077915795	Cr4
	0.056745865	Cr5
	0.071328577	Cr6
	0.161207405	Cr7
	0.106613073	Cr8
	0.052427116	Cr9
	0.035885344	Cr10
	0.03493244	Cr11
	0.055281845	Cr12
	0.073488891	Cr13
	0.080334116	Cr14

Para poder evaluar la solución más viable para el proyecto deberán realizarse matrices de comparación entre las tres soluciones propuestas, una matriz por cada criterio definido. También de estas matrices tendrán que realizarse matrices de comparación y vectores de ponderación. A continuación, se mostrarán las matrices y vectores.

Matrices de criterios para las combinaciones seleccionadas					Vector de prioridad						
MCr1	A	B	C		MCr1	A	B	C	$\Sigma x$	V <sub>Cr1</sub> =	0.44444444
A	1	1	4		A	0.44444	0.44444	0.44444	1.33333	0.44444444	0.11111111
B	1	1	4		B	0.44444	0.44444	0.44444	1.33333		
C	1/4	1/4	1		C	0.11111	0.11111	0.11111	0.33333		
$\Sigma y$	2.25	2.25	9		$\Sigma y$	1	1	1		$\Sigma y$	1
MCr2	A	B	C		MCr2	A	B	C	$\Sigma x$	V <sub>Cr2</sub> =	0.10219994
A	1	1/3	1/5		A	0.11111111	0.052631579	0.142857143	0.306599833	0.21136174	0.68643832
B	3	1	1/5		B	0.33333333	0.157894737	0.142857143	0.634085213		
C	5	5	1		C	0.55555556	0.789473684	0.714285714	2.059314954		
$\Sigma y$	9	6.333	1.4		$\Sigma y$	1	1	1		$\Sigma y$	1
MCr3	A	B	C		MCr3	A	B	C	$\Sigma x$	V <sub>Cr3</sub> =	0.10384738
A	1	1/5	1/3		A	0.11111111	0.137931034	0	0.311542146	0.66507024	0.23108238
B	5	1	4		B	0.55555556	0.689655172	3/4	1.995210728		
C	3	1/4	1		C	0.33333333	0.172413793	0.1875	0.693247126		
$\Sigma y$	9	14/9	51/3		$\Sigma y$	1	1	1		$\Sigma y$	1





**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Matrices de criterios para las combinaciones seleccionadas

A	1	1/5	1/5
B	5	1	1
C	5	1	1
Σy	11	2.2	2.2

A	0.090909091	0.090909091	0.090909091	0.272727273
B	0.454545455	0.454545455	0.454545455	1.363636364
C	0.454545455	0.454545455	0.454545455	1.363636364
Σy	1	1	1	

Vector de prioridad	
VCr4=	0.09090909
	0.45454545
	0.45454545
Σy	1

MCr5	A	B	C
A	1	1/5	1/5
B	5	1	2
C	5	1/2	1
Σy	11	12/3	31/5

MCr5	A	B	C	Σx
A	0.090909091	0.117647059	0.0625	0.27105615
B	0.454545455	0.588235294	0.625	1.667780749
C	0.454545455	0.294117647	0.3125	1.061163102
Σy	1	1	1	

VCr5=	0.09035205
	0.55592692
	0.35372103
Σy	1

MCr6	A	B	C
A	1	1/5	1/4
B	5	1	5
C	4	1/5	1
Σy	10	12/5	61/4

MCr6	A	B	C	Σx
A	0.1	0.142857143	0.04	0.282857143
B	0.5	0.714285714	0.8	2.014285714
C	0.4	0.142857143	0.16	0.702857143
Σy	1	1	1	

VCr6=	0.09428571
	0.67142857
	0.23428571
Σy	1

MCr7	A	B	C
A	1	4	4
B	1/4	1	2
C	1/4	1/2	1
Σy	1.5	5.5	7

MCr7	A	B	C	Σx
A	0.666666667	0.727272727	0.571428571	1.965367965
B	0.166666667	0.181818182	0.285714286	0.634199134
C	0.166666667	0.090909091	0.142857143	0.4004329
Σy	1	1	1	

VCr7=	0.65512266
	0.21139971
	0.13347763
Σy	1

MCr8	A	B	C
A	1	3	3
B	1/3	1	4
C	1/3	1/4	1
Σy	1.667	4.25	8

MCr8	A	B	C	Σx
A	0.6	0.705882353	0.375	1.680882353
B	0.2	0.235294118	0.5	0.935294118
C	0.2	0.058823529	0.125	0.383823529
Σy	1	1	1	

VCr8=	0.56029412
	0.31176471
	0.12794118
Σy	1

MCr9	A	B	C
A	1	1/4	1/3
B	4	1	3
C	3	1/3	1
Σy	8	14/7	41/3

MCr9	A	B	C	Σx
A	0.125	0.157894737	0.076923077	0.359817814
B	0.5	0.631578947	0.692307692	1.82388664
C	0.375	0.210526316	0.230769231	0.816295547
Σy	1	1	1	

VCr9=	0.11993927
	0.60796221
	0.27209852
Σy	1

MCr10	A	B	C
A	1	1/4	3
B	4	1	4
C	1/3	1/4	1
Σy	5 1/3	11/2	8

MCr10	A	B	C	Σx
A	0.1875	0.166666667	0.375	0.729166667
B	0.75	0.666666667	0.5	1.916666667
C	0.0625	0.166666667	0.125	0.354166667
Σy	1	1	1	

VCr10=	0.24305556
	0.63888889
	0.11805556
Σy	1

MCr11	A	B	C
A	1	1/3	1/4
B	3	1	5
C	4	1/5	1
Σy	8	1.533	6.25

MCr11	A	B	C	Σx
A	0.125	0.217391304	0.04	0.382391304
B	0.375	0.652173913	0.8	1.827173913
C	0.5	0.130434783	0.16	0.790434783
Σy	1	1	1	

VCr11=	0.12746377
	0.60905797
	0.26347826
Σy	1



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Matrices de criterios para las combinaciones seleccionadas											
MCr12	A	B	C		MCr12	A	B	C	Σx	VCr12=	0.12746377
A	1	1/3	1/4		A	0.125	0.217391304	0.04	0.382391304	0.60905797	0.26347826
B	3	1	5		B	0.375	0.652173913	0.8	1.827173913	Σy	1
C	4	1/5	1		C	0.5	0.130434783	0.16	0.790434783		
Σy	8	1.533	6.25		Σy	1	1	1			
MCr13	A	B	C		MCr13	A	B	C	Σx	VCr13=	0.14285714
A	1	1/5	1		A	0.142857143	0.142857143	0.142857143	0.428571429	0.71428571	0.14285714
B	5	1	5		B	0.714285714	0.714285714	0.714285714	2.142857143	Σy	1
C	1	1/5	1		C	0.142857143	0.142857143	0.142857143	0.428571429		
Σy	7	1.4	7		Σy	1	1	1			
MCr14	A	B	C		MCr14	A	B	C	Σx	VCr14=	0.33333333
A	1	1	1		A	0.333333333	0.333333333	0.333333333	1	0.33333333	0.33333333
B	1	1	1		B	0.333333333	0.333333333	0.333333333	1	0.33333333	0.33333333
C	1	1	1		C	0.333333333	0.333333333	0.333333333	1	Σy	1
Σy	3	3	3		Σy	1	1	1			

Posteriormente, con las sumas de los resultados de los vectores de ponderación se obtiene la solución final, esta se muestra en un vector (Tabla 13) en donde la primera fila indica la ponderación de la solución propuesta A, la segunda fila la ponderación de la propuesta B y finalmente la ponderación de la solución C.

*Tabla 13. Vector de ponderación total*

Vector de ponderación total	
Atot=	0.276876
Btot=	0.464895
Ctot=	0.258230
Σy	1.000000

Para verificar este cálculo se realiza la suma de las ponderaciones la cual, debe dar 1.



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

En esta fase de evaluación mediante la matriz de prioridad de criterios se buscó y se aplicaron conocimientos científicos y técnicos, para determinar y evaluar los criterios definidos para el sistema, más adelante se analizarán los métodos de manufactura, selección de elementos eléctricos y software.

En el caso de software se consideraron tres opciones que permitirán simular los mecanismos 3D de manera gratuita para estudiantes. Y para la tarjeta se tomarán tres opciones, Arduino, raspberry y la DAQ de national instruments.

Para dar solución a la problemática con las opciones antes descritas se hará uso del método de objetivos ponderados ya que este es una herramienta utilizada para definir criterios de evaluación de las distintas soluciones a un problema.

Cross [28] menciona que la finalidad de este método es comparar los valores de utilidad de las propuestas de diseño alternativas, con base en su rendimiento frente a los objetivos diferencialmente ponderados.

Algunos parámetros no se pueden medir de manera fácil y cuantificable, pero sí es posible asignarles calificaciones conforme a una escala de puntos.

*Tabla 14. Tabla de ponderación de criterios*

Escala de 11 puntos	Significado	Escala de 5 puntos	Significado
0	Solución totalmente inútil	0	Inadecuada
1	Solución inadecuada		
2	Solución muy mala	1	Débil
3	Solución mala		
4	Solución tolerable		
5	Solución adecuada	2	Satisfactoria
6	Solución satisfactoria		
7	Solución buena	3	Buena
8	Solución muy buena		
9	Solución excelente	4	Excelente
10	Solución perfecta o ideal		

Estos valores de utilidad se utilizan después como base de comparación entre las posibles soluciones. Una de las comparaciones más sencillas que pueden hacerse consiste en sumar las calificaciones de los valores de utilidad para cada alternativa. Estas calificaciones totales permiten después que las alternativas sean evaluadas en orden de rendimiento general.



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Mediante las ponderaciones antes mencionadas se hará la evaluación de las distintas soluciones, estas comparaciones se muestran en la Tabla 17 y Tabla 18:

*Tabla 17. Comparación entre tarjetas*

OBJETIVO	PESO	PARAMETRO	ARDUINO			RASPERRY			National Instruments pci-6052e NI DAQ		
			MAGNITUD	CALIFICACIÓN	VALOR	MAGNITUD	CALIFICACIÓN	VALOR	MAGNITUD	CALIFICACIÓN	VALOR
FACILIDAD DE SERVICIO	0.3	Muy sencillo	Muy sencillo	10	3	Buena	7	2.1	Buena	7	2.1
COSTO	0.4	\$ 600.00	\$ 585.00	10	4	\$ 1,069.00	6	2.4	\$ 8,160.00	3	1.2
COMPATIBILIDAD CON OTROS SOFTWARE	0.3	Excelente	Excelente	10	3	Excelente	10	3	Buena	8	2.4
<b>TOTAL</b>	<b>1</b>		<b>TOTAL</b>	<b>10</b>		<b>TOTAL</b>	<b>7.5</b>		<b>TOTAL</b>	<b>5.7</b>	

*Tabla 18. Comparación entre software*

OBJETIVO	PESO	PARAMETRO	UNITY			LABVIEW			MATLAB		
			MAGNITUD	CALIFICACIÓN	VALOR	MAGNITUD	CALIFICACIÓN	VALOR	MAGNITUD	CALIFICACIÓN	VALOR
LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN	0.2	VISUAL GRAFICO	C#	4	0.8	VISUAL GRÁFICO	7	1.4	C	4	0.8
SIMULACIONES	0.3	3D	3D	7	2.1	3D	6	1.8	3D	6	1.8
COSTO PARA ESTUDIANTES	0.15	GRATIS	\$1,500	10	1.5	SIN COSTO-VERSIÓN ESTUDIANTIL	10	1.5	SIN COSTO-VERSIÓN ESTUDIANTIL	10	1.5
SISTEMA OPERATIVO	0.05	WINDOWS	WINDOWS	10	0.5	WINDOWS	10	0.5	WINDOWS	10	0.5
COMPATIBILIDAD	0.3	Excelente	Buena	8	2.4	Excelente	10	3	Buena	8	2.4
<b>TOTAL</b>	<b>1</b>		<b>TOTAL</b>	<b>7.3</b>		<b>TOTAL</b>	<b>8.2</b>		<b>TOTAL</b>	<b>7</b>	

### 7.2.6 Diseño del dominio específico

#### 7.2.6.1 Análisis cinemático

Para el desarrollo de los mecanismos es necesario conocer las ecuaciones cinemáticas que incluyen las ecuaciones de posición, velocidad y aceleración. Se obtendrían en total 42 ecuaciones que describirán el comportamiento de los mecanismos.

Tabla 20. Mecanismos totales

<b>M E C A N I S M O S</b>	<b>Manivela-corredera</b>	Descentrada Axial
	<b>Mecanismos 4 barras</b>	Manivela-balancín
		Manivela-manivela
		Balancín-balancín
	<b>Mecanismo de colisa</b>	Colisa rectilínea
	<b>Yugo escoces</b>	
	<b>Mecanismos de retorno rápido</b>	Whitworth
	<b>Mecanismo de línea recta</b>	Chebyshev

#### 7.2.6.1.1 Biela manivela corredera centrada y descentrada

En el caso de la biela manivela corredera se puede hacer una sola ecuación donde la excentricidad se considere para ambas y el dato sea cero para la manivela corredera centrada, También los mecanismos que entran en la clasificación de cuatro barras sus ecuaciones son iguales lo que cambia entre un mecanismo y otro es la longitud de los eslabones, según lo mencionado en el marco teórico en la ley de Grashof.

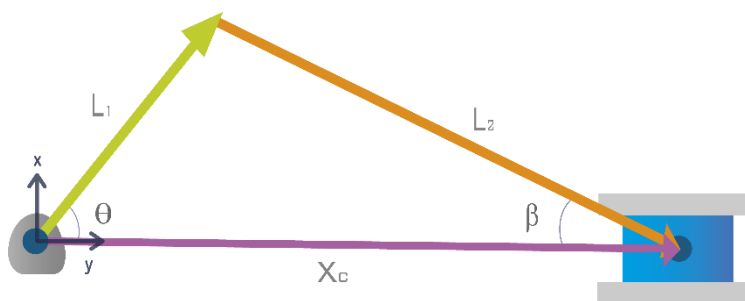
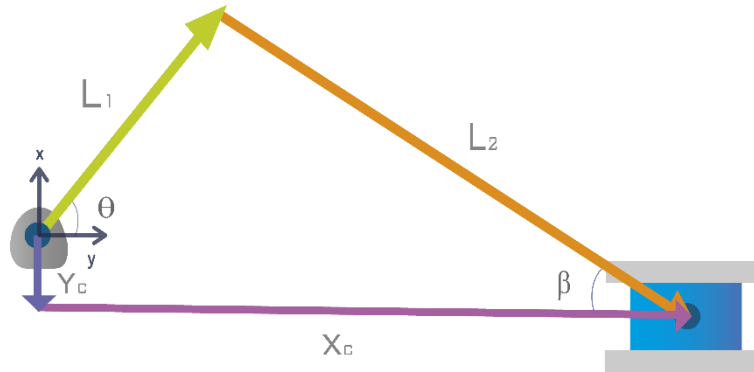


Figura 30. Biela manivela corredera centrada

En este caso se agregará un dato llamado excentricidad " $X_c$ ", este dato se considerará como dato de entrada y constante. Para obtener los valores de la posición variable se hará la suma de los vectores que conforman el lazo del mecanismo de acuerdo con la Figura 30. Biela manivela corredera centrada y en la Figura 31.

**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



*Figura 31. Biela manivela corredera descentrada*

Para obtener las ecuaciones de posición se realizó un lazo cerrado, iniciando en el origen del sistema de referencia y retornado a él nuevamente con el fin de igualar las ecuaciones a cero.

Se realiza el cálculo de la posición tanto en el eje de las ordenadas, como en el eje de las abscisas.

*Ecuaciones de posición.*

$$\sum_x = L1 \cos \theta + L2 \cos \beta - X_c = 0$$

$$\sum_y = L1 \sin \theta - L2 \sin \beta + Y_c = 0$$

Para obtener las ecuaciones que van a ayudar al cálculo de las ecuaciones se deriva las ecuaciones de posición cuyos componentes cambian a través del tiempo, es decir longitudes o ángulos.

*Ecuaciones de velocidad.*

$$\sum_{\dot{x}} = -L1 \sin \theta \dot{\theta} - L2 \sin \beta \dot{\beta} - \dot{X}_c = 0$$

$$\sum_{\dot{y}} = L1 \cos \theta \dot{\theta} - L2 \cos \beta \dot{\beta} = 0$$

Ahora para obtener las ecuaciones de aceleración se derivan las ecuaciones de velocidad, considerando que se realiza derivando aquellos componentes que cambian a través del tiempo.

*Ecuaciones de aceleración.*

$$\sum_{\ddot{x}} = -L1 \cos \theta \dot{\theta}^2 - L1 \sin \theta \ddot{\theta} - L2 \cos \beta \dot{\beta}^2 - L2 \sin \beta \ddot{\beta} - \ddot{X}_c = 0$$

$$\sum_{\ddot{y}} = -L1 \sin \theta \dot{\theta}^2 + L1 \cos \theta \ddot{\theta} + L2 \sin \beta \dot{\beta}^2 - L2 \cos \beta \ddot{\beta} = 0$$

**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**7.2.6.1.2 Mecanismo cuatro barras**

Para el cálculo de posición para este mecanismo y para los demás mecanismos mostrados en la Figura 32, se realiza la misma operación anterior, es decir se realiza un lazo cerrado para poder igualar a cero. Estas ecuaciones también servirán para el cálculo de las ecuaciones para el mecanismo de Chebyshev.

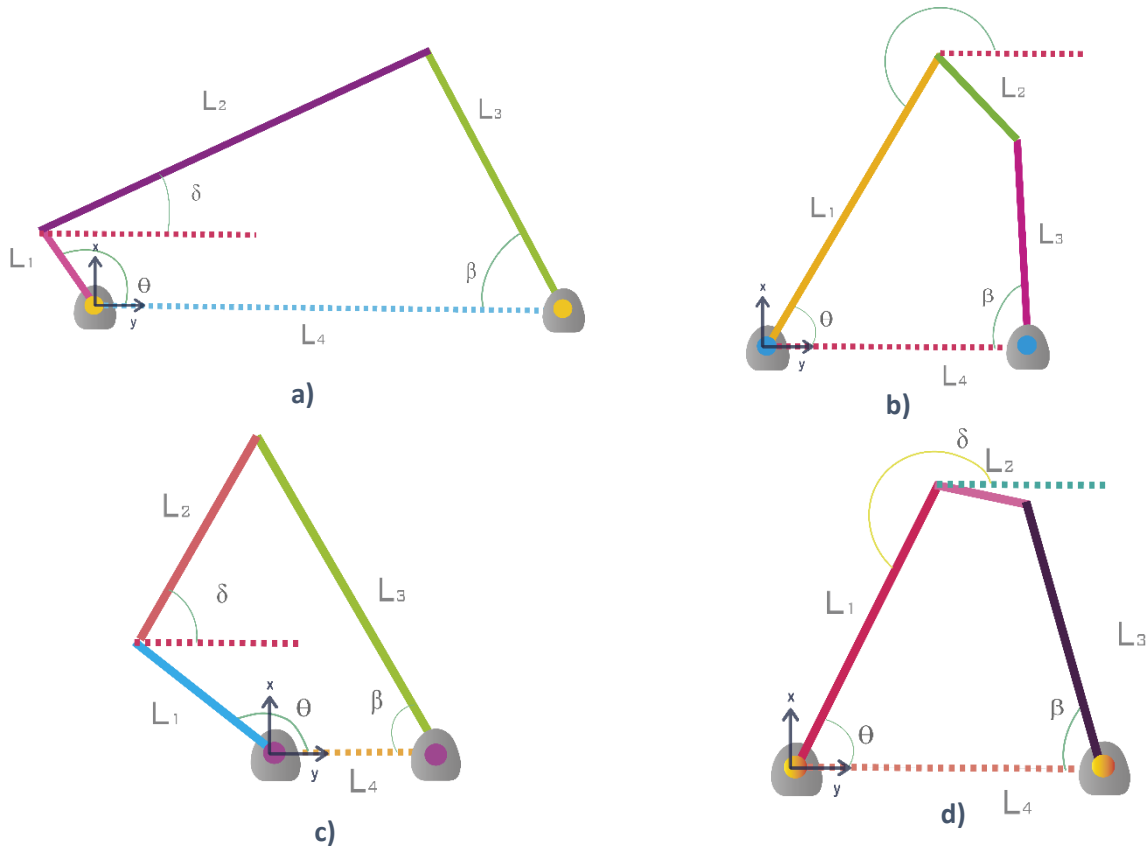


Figura 32. Mecanismos de cuatro barras

*Ecuaciones de posición.*

$$\sum_x = L1 \cos \theta + L2 \cos \delta + L3 \cos \beta - L4 = 0$$

$$\sum_y = L1 \sin \theta + L2 \sin \delta - L3 \sin \beta = 0$$

*Ecuaciones de velocidad*

$$\sum_x = - L1 \sin \theta \dot{\theta} - L2 \sin \delta \dot{\delta} - L3 \sin \beta \dot{\beta} = 0$$

$$\sum_y = L1 \cos \theta \dot{\theta} + L2 \cos \delta \dot{\delta} - L3 \cos \beta \dot{\beta} = 0$$





TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

*Ecuaciones de aceleración*

$$\sum_{\ddot{x}} = -L1 \cos \theta \dot{\theta}^2 - L1 \sin \theta \ddot{\theta} - L2 \cos \delta \dot{\delta}^2 - L2 \sin \delta \ddot{\delta} - L3 \cos \beta \dot{\beta}^2 - L3 \sin \beta \ddot{\beta} = 0$$

$$\sum_{\ddot{y}} = -L1 \sin \theta \dot{\theta}^2 + L1 \cos \theta \ddot{\theta} - L2 \sin \delta \dot{\delta}^2 + L2 \cos \delta \ddot{\delta} + L3 \sin \beta \dot{\beta}^2 - L3 \cos \beta \ddot{\beta} = 0$$

7.2.6.1.3 Yugo escocés

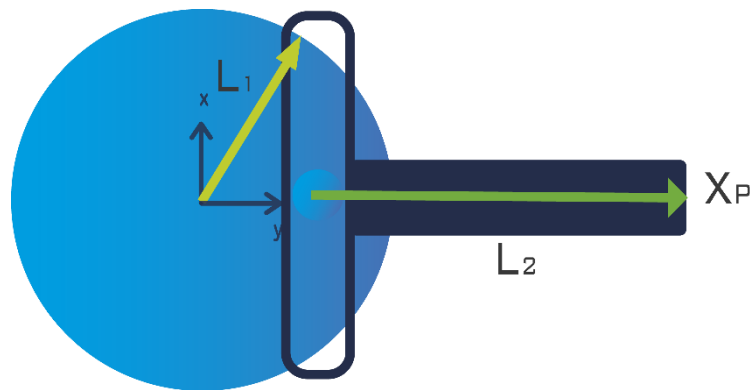


Figura 33. Yugo escocés

En el caso del mecanismo de Yugo escocés (Figura 33), para hacer el cálculo de posición no se iguala a cero ya que el cálculo de posición es directo.

*Ecuaciones de posición*

$$\sum_x = L1 \cos \theta$$

$$\sum_y = L1 \sin \theta$$

*Ecuaciones de velocidad*

$$\sum_{\dot{x}} = -L1 \sin \theta \dot{\theta} = 0$$

$$\sum_{\dot{y}} = L1 \cos \theta \dot{\theta} = 0$$



*Ecuaciones de aceleración*

$$\sum_{\ddot{x}} = -L1 \cos \theta \ddot{\theta} - L1 \sin \theta \dot{\theta}^2 = 0$$

$$\sum_{\ddot{y}} = -L1 \sin \theta \ddot{\theta} + L1 \cos \theta \dot{\theta}^2 = 0$$

7.2.6.1.4 Colisa rectilínea

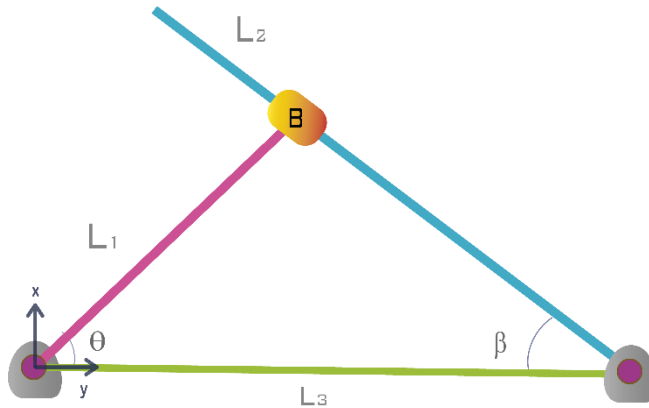


Figura 34. Colisa rectilínea

Para este mecanismo a diferencia de los demás una de las longitudes cambia con respecto del tiempo por lo que al momento de derivar se tomará en cuenta.

*Ecuaciones de posición*

$$\sum_x = L1 \cos \theta + L2 \cos \beta - L3 = 0$$

$$\sum_y = L1 \sin \theta - L2 \sin \beta = 0$$

*Ecuaciones de velocidad*

$$\sum_{\dot{x}} = -L1 \sin \theta \dot{\theta} - L2 \sin \beta \dot{\beta} + \dot{L}2 \cos \beta = 0$$

$$\sum_{\dot{y}} = L1 \cos \theta \dot{\theta} - L2 \cos \beta \dot{\beta} - \dot{L}2 \sin \beta = 0$$

*Ecuaciones de aceleración*

$$\sum_{\ddot{x}} = -L1 \cos \theta \dot{\theta}^2 - L1 \sin \theta \ddot{\theta} - 2 L2 \sin \beta \dot{\beta} - L2 \cos \beta \dot{\beta}^2 - L2 \sin \beta \ddot{\beta} + L2 \cos \beta = 0$$

$$\sum_{\ddot{y}} = -L1 \sin \theta \dot{\theta}^2 + L1 \cos \theta \ddot{\theta} - 2 L2 \cos \beta \dot{\beta} + L2 \sin \beta \dot{\beta}^2 - L2 \cos \beta \ddot{\beta} - L2 \sin \beta = 0$$

**7.2.6.1.5 Mecanismo Whitworth**

Para el mecanismo de Whitworth tendrá que realizarse el análisis mediante dos lazos.

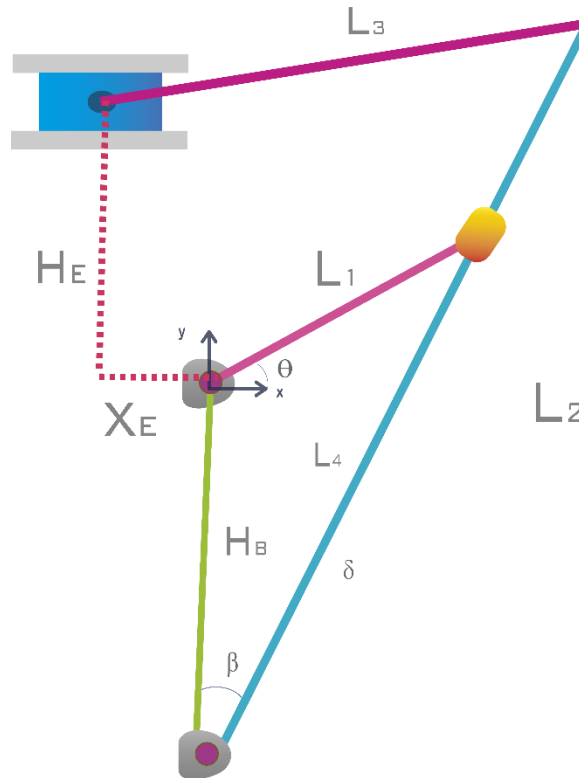


Figura 35. Mecanismo de Whitworth

Para obtener las primeras ecuaciones de posición se realizará un lazo vectorial que incluya el eslabón 1 la distancia que recorre la corredera nombrada L4 y por último la distancia que existe entre las dos partes fijas del eslabón L1 y L2 nombrada h<sub>B</sub>.

$$\sum_x = L1 \cos \theta - L4 \cos \beta = 0$$



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

$$\sum_y = L1 \sin \theta - L4 \sin \beta + hB = 0$$

Para la obtención del segundo lazo cerrado se toma en cuenta las distancias hB y he en el eje de las “y”, la distancia variable “xe” para el eje de las “x”, los eslabones L2 y L3 y los ángulos  $\beta$  y  $\delta$

$$\sum_x = L2 \cos \beta - L3 \cos \delta + Xe = 0$$

$$\sum_y = -hB + L2 \sin \beta - L3 \sin \delta - he = 0$$

Para la obtención de la velocidad se realiza la derivación de las 4 ecuaciones anteriores con aquellos elementos que cambian su valor con respecto al tiempo.

$$\sum_{\dot{x}} = -L1 \sin \theta \dot{\theta} - L4 \cos \beta + L4 \sin \beta \dot{\beta} = 0$$

$$\sum_{\dot{y}} = L1 \cos \theta \dot{\theta} - L4 \sin \beta - L4 \cos \beta \dot{\beta} = 0$$

$$\sum_{\dot{x}} = -L2 \sin \beta \dot{\beta} + L3 \sin \delta \dot{\delta} + \dot{Xe} = 0$$

$$\sum_{\dot{y}} = L2 \cos \beta \dot{\beta} - L3 \cos \delta \dot{\delta} = 0$$

Para la obtención de las ecuaciones de aceleración se derivan las ecuaciones de velocidad todas con respecto al tiempo

$$\sum_{\ddot{x}} = -L1 \sin \theta \ddot{\theta} - L1 \cos \theta \dot{\theta}^2 - \ddot{L4} \cos \beta + 2 \dot{L4} \sin \beta \dot{\beta} + L4 \cos \beta \dot{\beta}^2 + L4 \sin \beta \ddot{\beta} = 0$$

$$\sum_{\ddot{y}} = -L1 \cos \theta \ddot{\theta} - L1 \sin \theta \dot{\theta}^2 - \ddot{L4} \sin \beta - 2 \dot{L4} \cos \beta \dot{\beta} + L4 \sin \beta \dot{\beta}^2 - L4 \cos \beta \ddot{\beta} = 0$$

$$\sum_{\ddot{x}} = -L2 \sin \beta \ddot{\beta} - L2 \cos \beta \dot{\beta}^2 + L3 \sin \delta \ddot{\delta} + L3 \cos \delta \dot{\delta}^2 + \ddot{Xe} = 0$$

$$\sum_{\ddot{y}} = L2 \cos \beta \ddot{\beta} - L2 \sin \beta \dot{\beta}^2 - L3 \cos \delta \ddot{\delta} + L3 \sin \delta \dot{\delta}^2 = 0$$

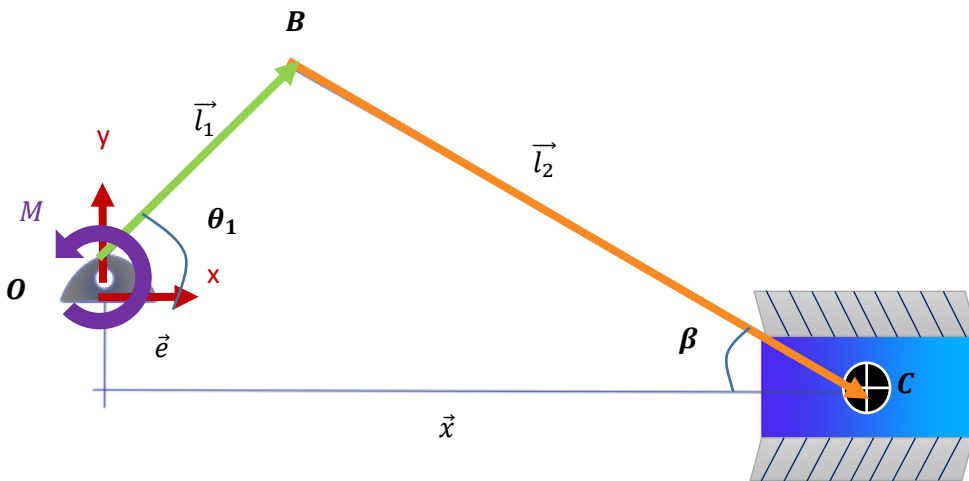
### 7.2.6.2 Análisis dinámico

Para poder analizar las fuerzas, torques y esfuerzos es necesario realizar el análisis cinemático del mecanismo biela manivela corredera.

Para este análisis se utilizará la 2da Ley de Newton presentada en la ecuación

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \quad (2)$$

Este análisis se realizará para el mecanismo implementado en físico ya que mediante estos cálculos podrán ser seleccionados los componentes electrónicos, materiales y secciones.



#### DATOS CONOCIDOS:

- $L_1$
- $L_2$
- $E$
- $M_1$
- $M_2$
- $M_c$

Figura 38. Biela manivela corredera para análisis dinámico

Con los datos presentados anteriormente se analizará el mecanismo, tomando también en cuenta las ecuaciones y resultados de aceleraciones del análisis cinemático.

Para verificar los cálculos realizados se obtendrán las velocidades y aceleraciones angulares y lineales del mecanismo biela manivela por el método analítico:

Se comenzará definiendo los vectores  $\vec{r}_{BO}$  y  $\vec{r}_{CB}$

$$\vec{r}_{BO} = \begin{bmatrix} \frac{L_1}{2} \cos\theta_1 \\ \frac{L_1}{2} \sin\theta_1 \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \vec{r}_{CB} = \begin{bmatrix} \frac{L_2}{2} \cos\beta \\ -\frac{L_2}{2} \sin\beta \end{bmatrix}$$



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

Los datos que se conocen son la velocidad angular de entrada, ya que ésta será ingresada por el usuario, las longitudes y masas de los eslabones. La velocidad lineal de la corredera se definiría como:

$$\begin{bmatrix} V_c \\ 0 \end{bmatrix} = \omega_1 \begin{bmatrix} \frac{L_1}{2} \operatorname{sen}\theta_1 \\ \frac{L_1}{2} \operatorname{cos}\theta_1 \end{bmatrix} + \omega_2 \begin{bmatrix} \frac{L_2}{2} \operatorname{sen}\beta \\ -\frac{L_2}{2} \operatorname{cos}\beta \end{bmatrix}$$

Siendo:

$V_c$  : Velocidad lineal de la corredera

$\omega_1$ : Velocidad angular del eslabón 1

$\omega_2$ : Velocidad angular del eslabón 2

$$\omega_1 \left( \frac{L_1}{2} \operatorname{cos}\theta_1 \right) + \omega_2 \left( -\frac{L_2}{2} \operatorname{cos}\beta \right) = 0$$

Por lo tanto, desarrollando y simplificando se tiene la velocidad angular del eslabón 2 con la ecuación ( 3):

$$\omega_2 = \frac{\omega_1 \left( \frac{L_1}{2} \operatorname{cos}\theta_1 \right)}{\left( -\frac{L_2}{2} \operatorname{cos}\beta \right)} \quad (3)$$

Y la velocidad lineal de la corredera:

$$V_c = \omega_1 \left( \frac{L_1}{2} \operatorname{sen}\theta_1 \right) + \omega_2 \left( \frac{L_2}{2} \operatorname{sen}\beta \right) \quad (4)$$

Para calcular la aceleración de la manivela  $a_c$ , se debe tomar en cuenta la aceleración del eslabón 2  $a_2$  tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} a_c \\ 0 \end{bmatrix} = \omega_1^2 \begin{bmatrix} \frac{L_1}{2} \operatorname{cos}\theta_1 \\ -\frac{L_1}{2} \operatorname{sen}\theta_1 \end{bmatrix} + \alpha_2 \begin{bmatrix} \frac{L_2}{2} \operatorname{sen}\beta \\ -\frac{L_2}{2} \operatorname{cos}\beta \end{bmatrix} + \omega_2^2 = \begin{bmatrix} a_c \\ 0 \end{bmatrix} m/s^2$$

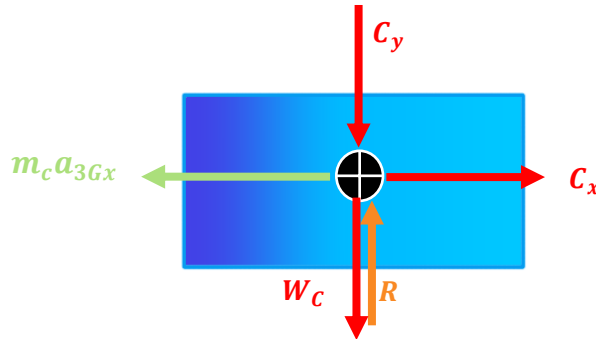
Como todas las fuerzas dependen del ángulo de entrada  $\theta_1$  y éste variará, se programará en MATLAB un script que permita ver los resultados en los 360° que puede girar la manivela.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



Las fuerzas de cada eslabón se presentarán a continuación:



*Figura 39. Fuerzas en la corredera*

Basado en la Figura 39 se tiene que el balance es el de la ecuación ( 5):

$$\sum \vec{F}_x = m_c \vec{a}_{Cx} \quad (5)$$

En el caso de la corredera en x solo se tiene una fuerza  $C_x$  por lo que:

$$C_x = -m_c a_{Cx}$$

En el eje Y se tiene que la suma de fuerzas es igual a cero ya que no hay movimiento en este sentido.

$$\sum \vec{F}_y = 0$$

Sustituyendo las fuerzas presentes en y en el diagrama de cuerpo libre se tiene:

$$R - C_y - W_C = 0$$

Por lo que la fuerza de reacción con el eslabón que sostiene a la manivela es igual a:

$$R = C_y + W_C$$

Se obtiene la aceleración de la manivela con el lazo vectorial y sus derivadas quedando de la siguiente manera:

$$X_{G4x} = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \beta$$

$$0 = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \beta$$

Se derivan las dos ecuaciones para encontrar la velocidad:

$$\dot{X}_{G4x} = -l_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 - l_2 \sin \beta \dot{\beta}$$

$$0 = l_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 + l_2 \cos \beta \dot{\beta}$$





TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

Y se vuelve a derivar para obtener la aceleración:

$$\ddot{X}_{G4x} = -l_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1^2 - l_1 \sin \theta_1 \ddot{\theta}_1 - l_2 \cos \beta \dot{\beta}^2 - l_2 \sin \beta \ddot{\beta}$$

$$0 = -l_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1^2 + l_1 \cos \theta_1 \ddot{\theta}_1 - d \sin \beta \dot{\beta}^2 + l_2 \cos \beta \ddot{\beta}$$

Considerando que la aceleración en el eslabón 1 es cero se tiene:

$$\ddot{X}_{G4x} = -l_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1^2 - l_2 \cos \beta \dot{\beta}^2 - l_2 \sin \beta \ddot{\beta}$$

$$0 = -l_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1^2 - l_2 \sin \beta \dot{\beta}^2 + l_2 \cos \beta \ddot{\beta}$$

De estas ecuaciones se despeja  $\ddot{\beta}$

$$\ddot{\beta} = \frac{-l_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1^2 - l_2 \sin \beta \dot{\beta}^2}{-l_2 \cos \beta} \quad (6)$$

En este caso  $\ddot{\beta}$  es igual a la aceleración angular de la biela como se muestra en la ecuación (5).

$$\alpha_{G2} = \ddot{\beta}$$

Sustituyendo este valor en la ecuación siguiente:

$$\ddot{X}_{G4x} = -l_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1^2 - l_2 \cos \beta \dot{\beta}^2 - l_2 \sin \beta \ddot{\beta} \quad (7)$$

Obteniendo así la aceleración lineal de la corredera con la ecuación (7).



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



Para el segundo eslabón tendrán que verse reflejadas las reacciones C quedando las fuerzas como siguen a continuación en la Figura 40:

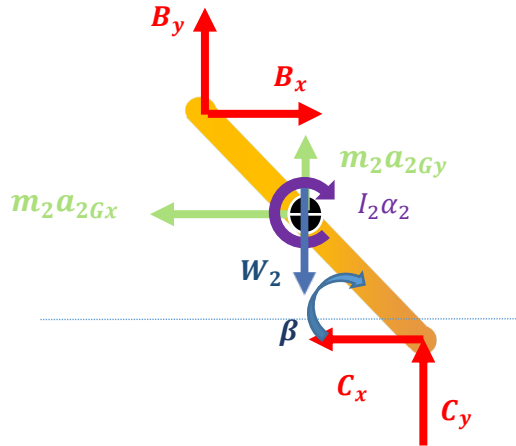


Figura 40. Fuerzas en el eslabón 2

Para la biela se tiene que las sumas de fuerzas son iguales a:

$$\sum \vec{F}_x = m_2 \vec{a}_{G2x}$$

$$\sum \vec{F}_y = m_2 \vec{a}_{G2y}$$

Y que el momento es igual a:

$$\sum M_G = I \alpha_2$$

Por lo tanto, sustituyendo se obtiene:

$$B_x - C_x = -m_2 a_{G2x}$$

Para fuerzas verticales se tiene:

$$C_y + B_y - W_2 = m_2 a_{G2y}$$

Y para el momento se multiplica cada fuerza por su distancia al centro de masa.

$$-\frac{L_2}{2} B_x \sin \beta - \frac{L_2}{2} B_y \cos \beta - \frac{L_2}{2} C_x \sin \beta - C_y \cos \beta = I_2 \alpha_2$$

Para obtener el momento de inercia de una barra se tiene la formula presentada en la ecuación ( 8 ) :



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



$$I = \frac{ml^2}{12} \quad (8)$$

Por lo tanto, se sustituyen los valores de la barra 2:

$$I_2 = \frac{m_2 L_2^2}{12} = \text{kgm}^2$$

Para obtener la aceleración del centro de gravedad del eslabón dos debe realizarse el análisis a un nuevo lazo vectorial:

Donde:

$$X_{G2x} = l_1 \cos \theta_1 + d \cos \beta$$

$$Y_{G2x} = l_1 \sin \theta_1 + d \sin \beta$$

Se derivan las dos ecuaciones para encontrar la velocidad:

$$\dot{X}_{G2x} = -l_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 - d \sin \beta \dot{\beta}$$

$$\dot{Y}_{G2x} = l_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 + d \cos \beta \dot{\beta}$$

Y se vuelve a derivar para obtener la aceleración:

$$\ddot{X}_{G2x} = -l_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1^2 - l_1 \sin \theta_1 \ddot{\theta}_1 - d \cos \beta \dot{\beta}^2 - d \sin \beta \ddot{\beta}$$

$$\ddot{Y}_{G2x} = -l_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1^2 + l_1 \cos \theta_1 \ddot{\theta}_1 - d \sin \beta \dot{\beta}^2 + d \cos \beta \ddot{\beta}$$

Considerando que la aceleración en el eslabón 1 es cero se tiene:

$$\ddot{X}_{G2x} = -l_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1^2 - d \cos \beta \dot{\beta}^2 - d \sin \beta \ddot{\beta} \quad (9)$$

$$\ddot{Y}_{G2x} = -l_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1^2 - d \sin \beta \dot{\beta}^2 + d \cos \beta \ddot{\beta} \quad (10)$$

Con las ecuaciones (9) y (10) se obtienen las aceleraciones en el centro de gravedad del eslabón 2.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



Para el eslabón 1 las fuerzas se presentan en la Figura 41.

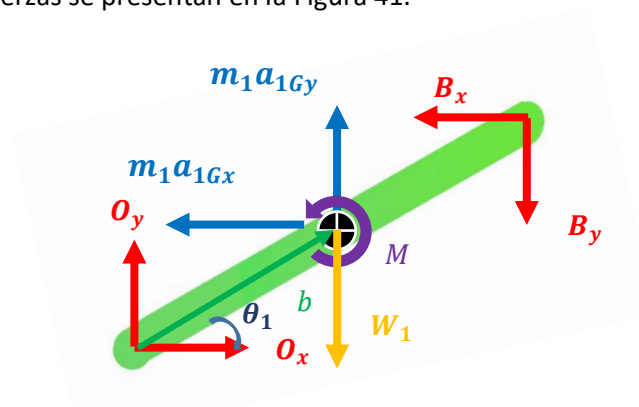


Figura 41. Fuerzas en el eslabón 1

Para la manivela se repite el análisis del eslabón 2, considerando que la sumatoria de momentos se igualaría a cero porque la velocidad es constante y no hay aceleración angular. Quedando entonces:

$$\sum \vec{F}_x = m_1 \vec{a}_{G1x}$$

$$\sum \vec{F}_y = m_1 \vec{a}_{G1y}$$

Y que el momento es igual a:

$$\sum M_G = 0$$

Por lo tanto, sustituyendo se tiene que la sumatoria de las fuerzas en x son:

$$O_x - B_x = -m_1 a_{G1x}$$

La sumatoria de fuerzas en y el eje Y sería:

$$O_y - B_y - W_1 = -m_1 a_{G1y}$$

En este caso también debe calcularse la aceleración en el centro de gravedad del eslabón 1 como se hizo en el eslabón pasado.

$$a_{G1} = a_o + (\vec{a}_{1/o})_{normal} + (\vec{a}_{1/o})_{tangencial}$$

Para la aceleración normal se debe calcularla con la velocidad angular del eslabón 2. Por lo tanto

$$a_{G1} = a_o - w_1^2 \times \vec{r}_{G1} + \alpha_1 \times \vec{r}_{G1}$$



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

Pero el punto O está fijo por lo que la aceleración de este punto es cero, al igual que la aceleración angular de este eslabón ya que la velocidad ingresada por el usuario es constante.

$$a_{G_1} = w_1^2 \times \overrightarrow{rG_1}$$

Donde

$$\overrightarrow{rG_1} = rG_1\hat{i} + rG_1\hat{j} = b\cos\theta_1 + b\text{sen}\theta_1$$

Por lo tanto:

$$a_{G_1} = w_1^2 \times \overrightarrow{rG_1}$$

Se calcula entonces el producto cruz, quedando como se indica a continuación:

$$w_1^2 \times \overrightarrow{rG_1} = \det \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & 0 & w_1^2 \\ b\cos\theta_1 & b\text{sen}\theta_1 & 0 \end{vmatrix}$$

$$a_{G_1} = -w_1^2 b\text{sen}\theta_1\hat{i} + w_1^2 b\cos\theta_1\hat{j}$$

Simplificando se obtiene que la aceleración del centro de masa  $a_{G_1}$  del eslabón 1 es:

$$a_{G_1} = -w_1^2 \begin{bmatrix} -b\text{sen}\theta_1 \\ b\cos\theta_1 \end{bmatrix}$$

Para el momento

$$\frac{L_1}{2} O_x \text{sen}\theta_1 + \frac{L_1}{2} O_y \cos\theta_1 + \frac{L_1}{2} B_x \text{sen}\theta_1 + B_y \cos\theta_1 = I\alpha_2$$



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

Para verificar el cálculo de la cinemática y dinámica se desarrolló un script en MATLAB 2019b en el cual se introdujeron las ecuaciones mostradas en el análisis cinemático del mecanismo biela manivela. Los resultados para la corredera se muestran en la Figura 42:

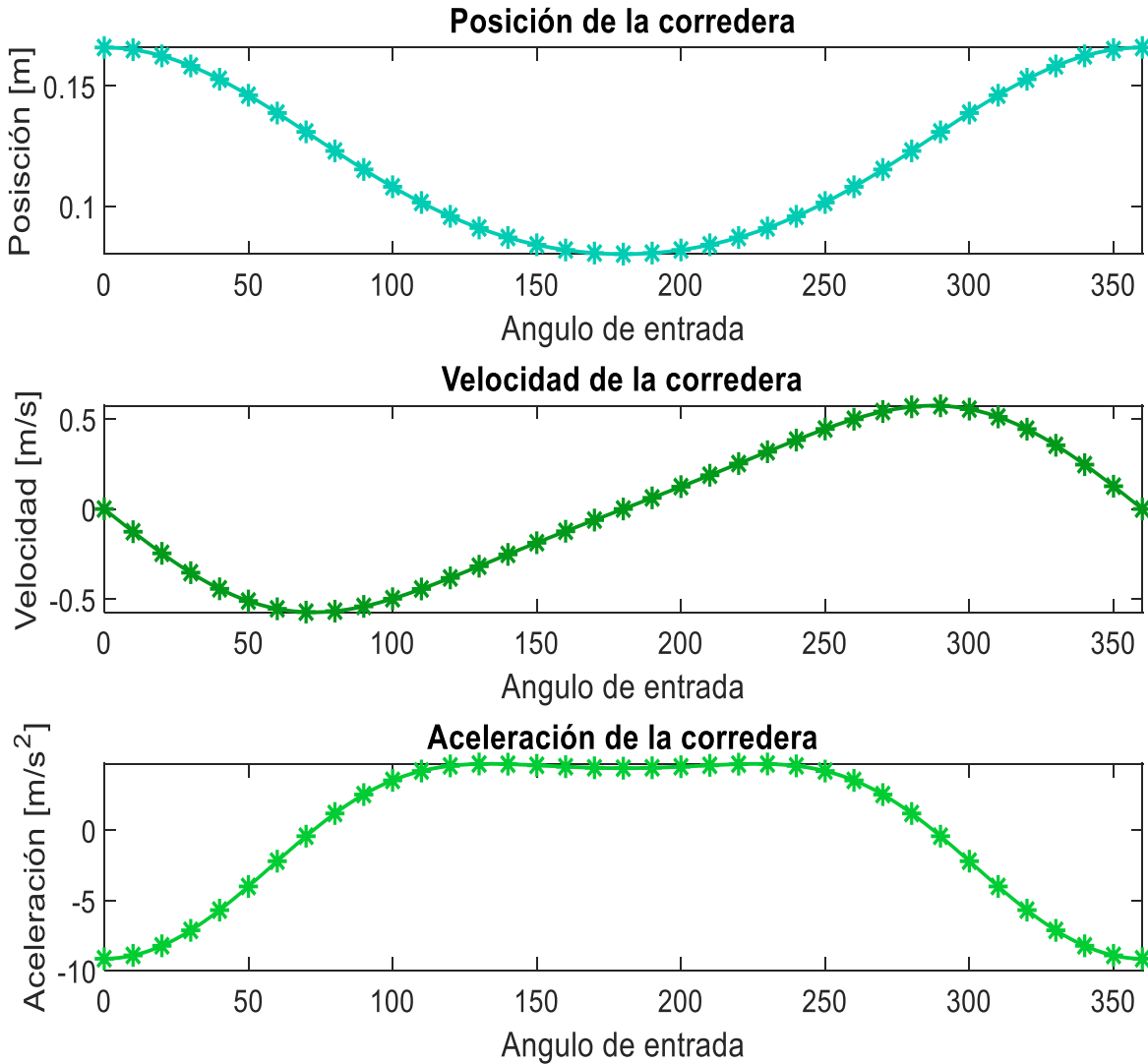


Figura 42. Resultados del análisis de cinemática realizado en Matlab



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

Como se puede observar en la Figura 44, la posición máxima que alcanza la corredera en el eje x en Working Model es de 0.1659 m mientras que en MATLAB 2019b es de 0.1599 m. Al comparar los resultados se obtiene un error de 3.61% menor al 5% lo que comprueba que el cálculo es correcto.



Figura 44. Posición Working Model

Por otro lado, la velocidad de la corredera obtenida en la comprobación de Working Model es de 0.572 m, de igual manera el resultado en MATLAB 2019b es de 0.572, al compararse con el valor obtenido en Matlab se obtiene un error del 0% lo que comprueba que el cálculo es correcto.

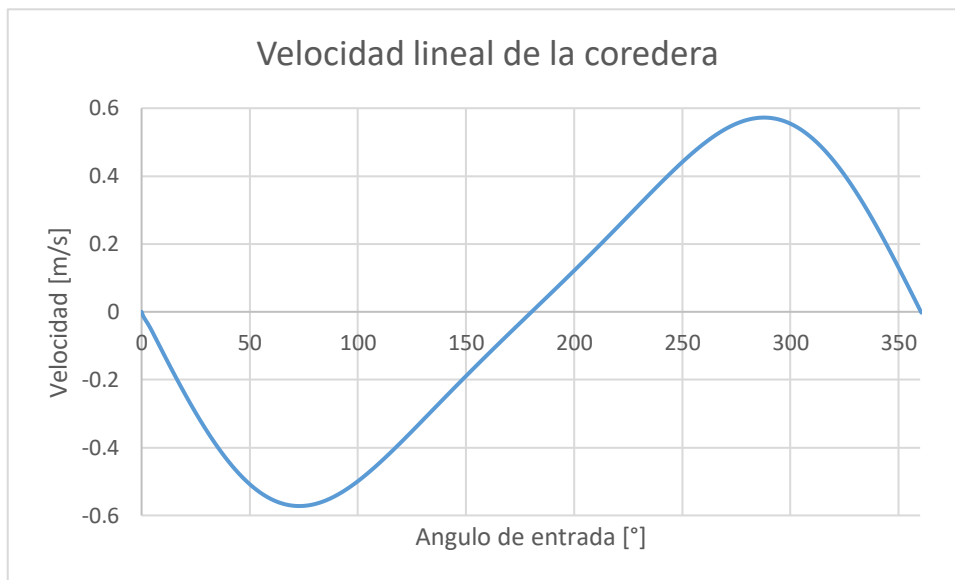


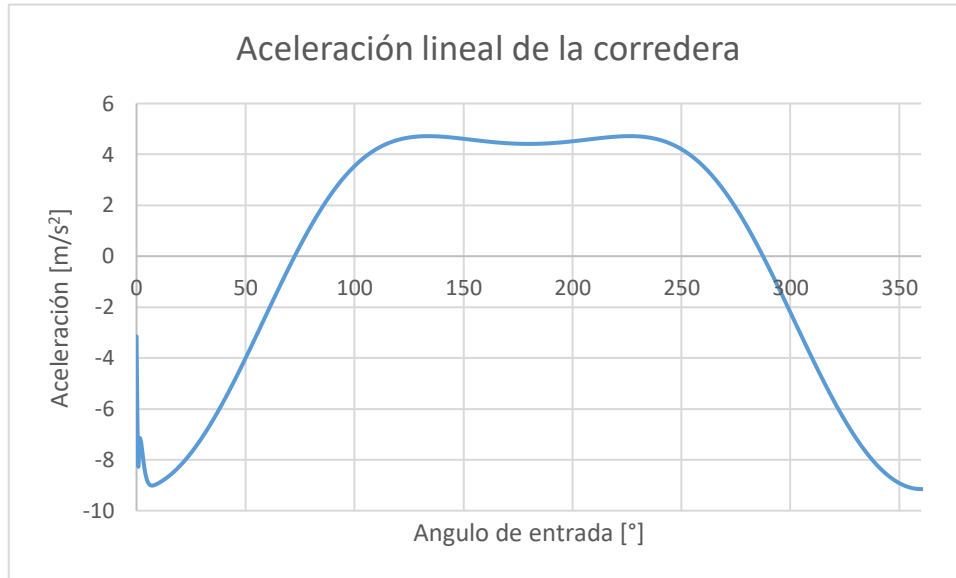
Figura 45. Velocidad biela manivela corredera





**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Para el análisis de la aceleración de la corredera se obtuvo un resultado de  $4.7140 \text{ m/s}^2$  en Working Model, mientras que en MATLAB 2019b un resultado de  $4.7140 \text{ m/s}^2$  dando como resultado un error del 0% indicando que el error es inexistente.



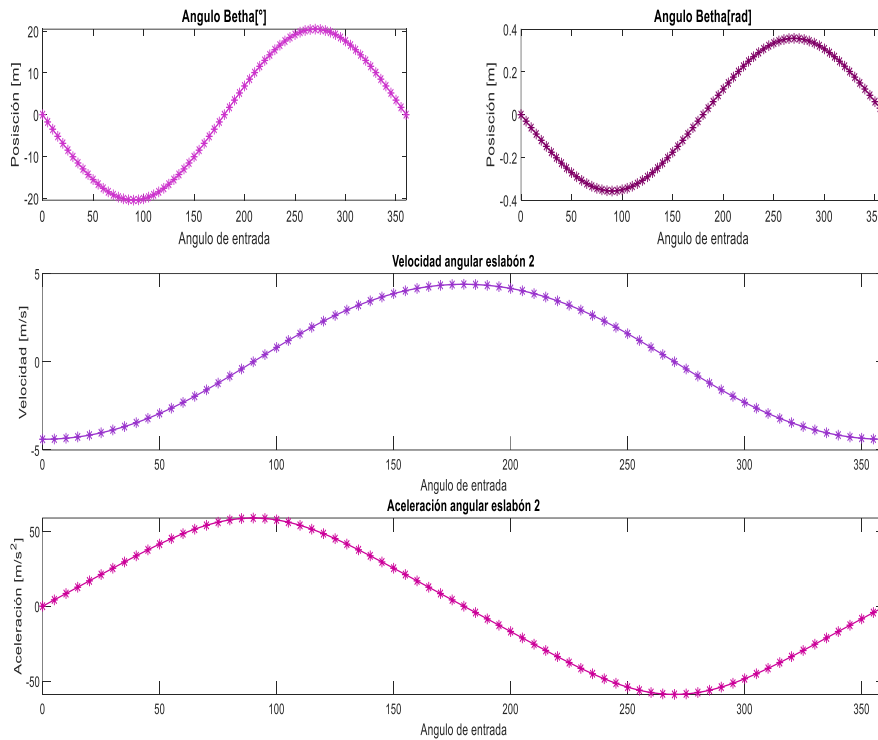
*Figura 47. Variación ángulo Beta*



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

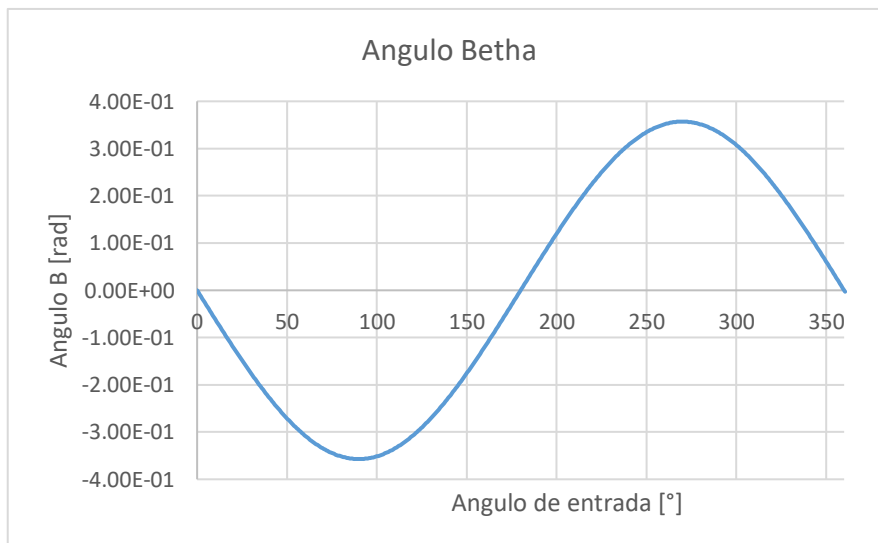


Posteriormente se realizó el análisis cinemático para el segundo eslabón respecto al ángulo Beta como se muestra en el cálculo analítico del mecanismo biela-manivela, obteniendo las siguientes gráficas en MATLAB 2019b descritas en la Figura 48.



*Figura 48. Posición, velocidad y aceleración angular*

Para el ángulo Beta se obtuvo un valor de 0.357 rad en Working Model mientras que en MATLAB 2019b tomo un valor de 0.3571, por lo tanto el error entre estas dos cantidades es de 0.02% lo que demuestra que el error menor al 5% y el calculo es correcto.



*Figura 40. Graficación del ángulo Beta obtenido en Working model*



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

Como se puede observar en la gráfica la velocidad angular máxima obtenida en Working Model para el segundo eslabón es de 4.39 rad/s, mientras tanto en MATLAB 2019b se obtuvo un resultado de 4.393 rad/s. El error calculado fue de 0.06% lo que comprueba que el cálculo del error es correcto ya que su valor es menor al 5%.

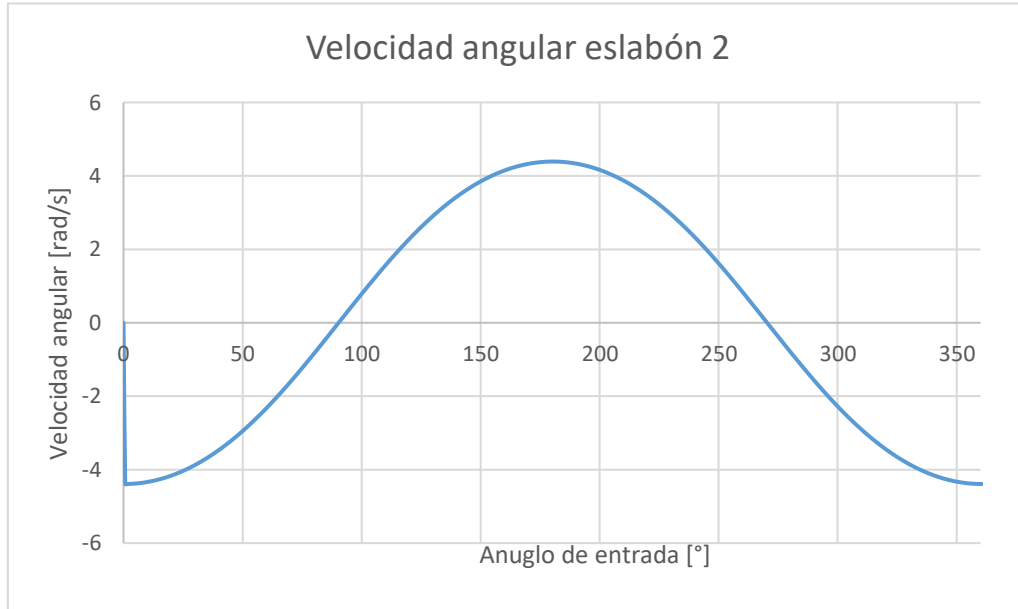


Figura 41. Velocidad angular eslabón 2

El resultado que se obtuvo al hacer el análisis de aceleración angular en Working Model fue de 58.844 rad/s<sup>2</sup> como se puede observar en la figura 42, el resultado obtenido en MATLAB 2019b fue de 58.92 rad/s<sup>2</sup> y al calcular el error este tuvo un porcentaje de 0.12% lo que comprueba que el error es menor al 5%, por lo tanto, es correcto.

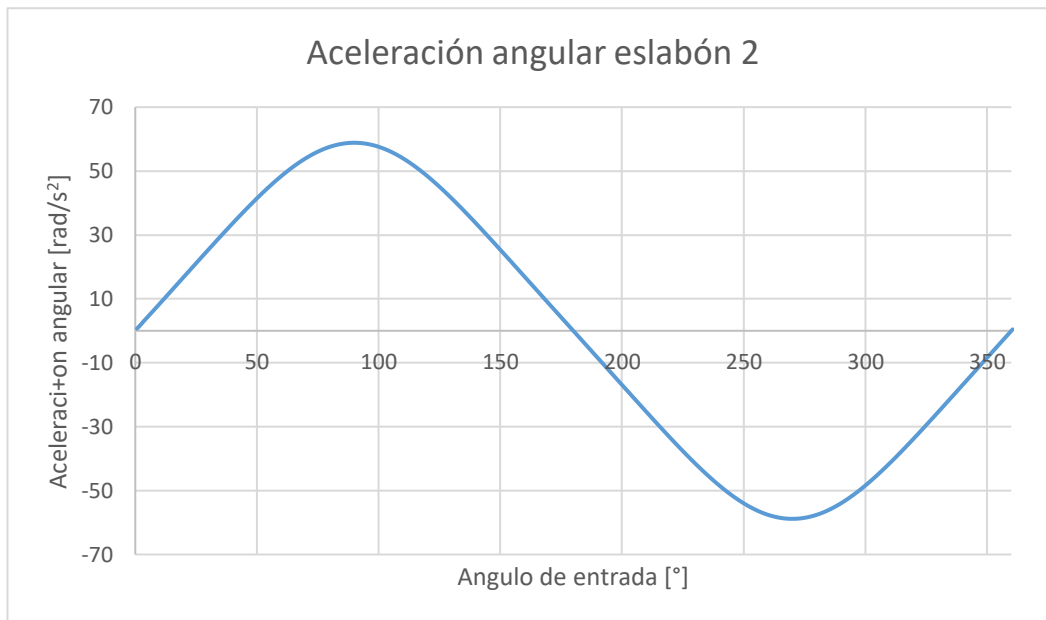


Figura 42. Aceleración angular eslabón 2



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

El cálculo de la cinemática del primer eslabón realizado en MATLAB 2019b se puede visualizar en la figura 43, ya que se pueden apreciar los valores máximos y mínimos de la posición, además de la velocidad y aceleración de este.

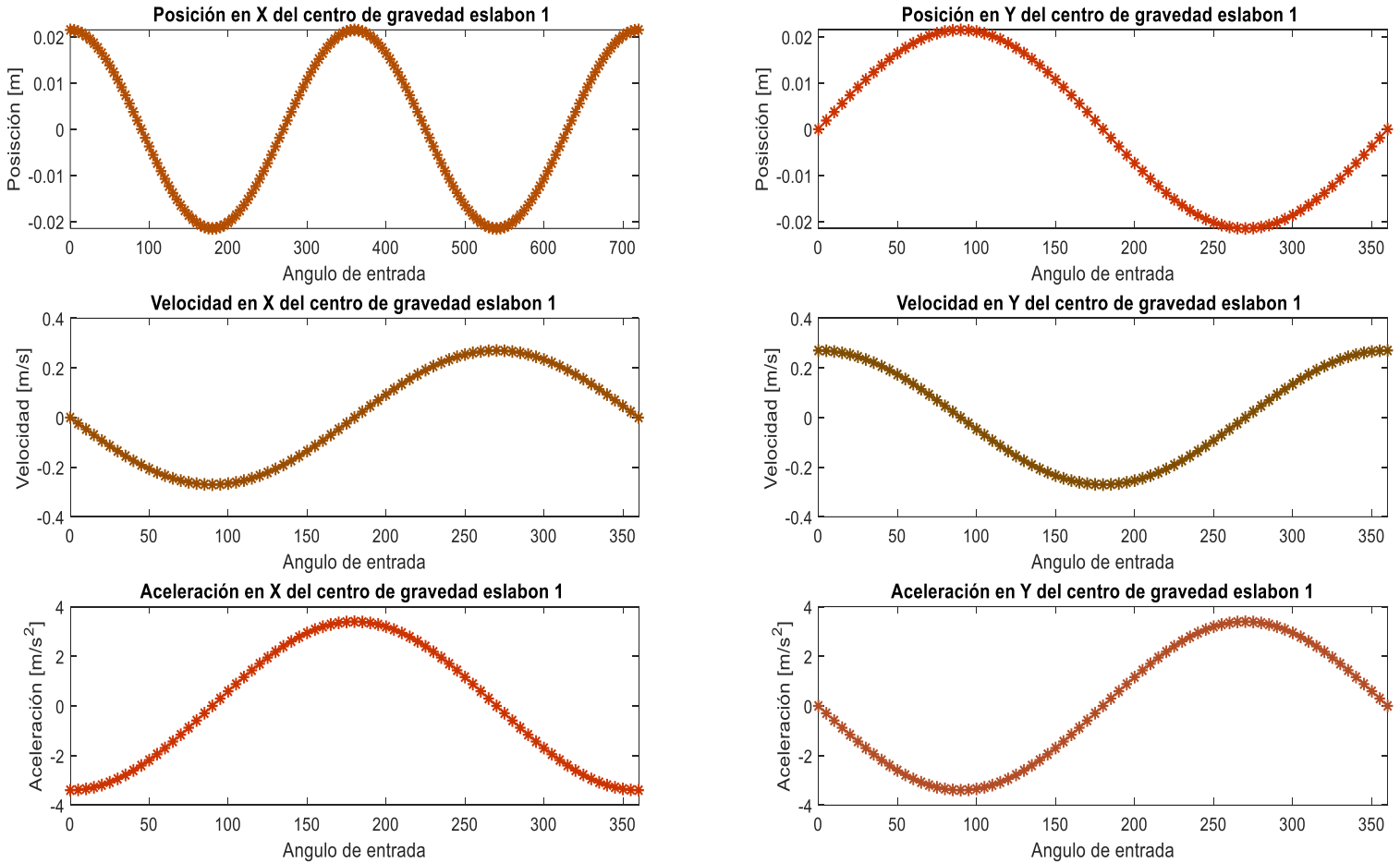


Figura 43. Posición, velocidad y aceleración del centro de gravedad eslabón 1



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

La posición obtenida en Working Model sobre el eje X del eslabón 1 es de 0.0215 m mientras que en MATLAB 2019b se obtuvo el mismo valor, como consecuente el error toma un porcentaje del 0% para el eje X. Mientras que el eje Y sucede lo mismo, el valor de la posición fue igual al que se obtiene en el eje X por lo que el cálculo es correcto ya que el error es igual a 0%.

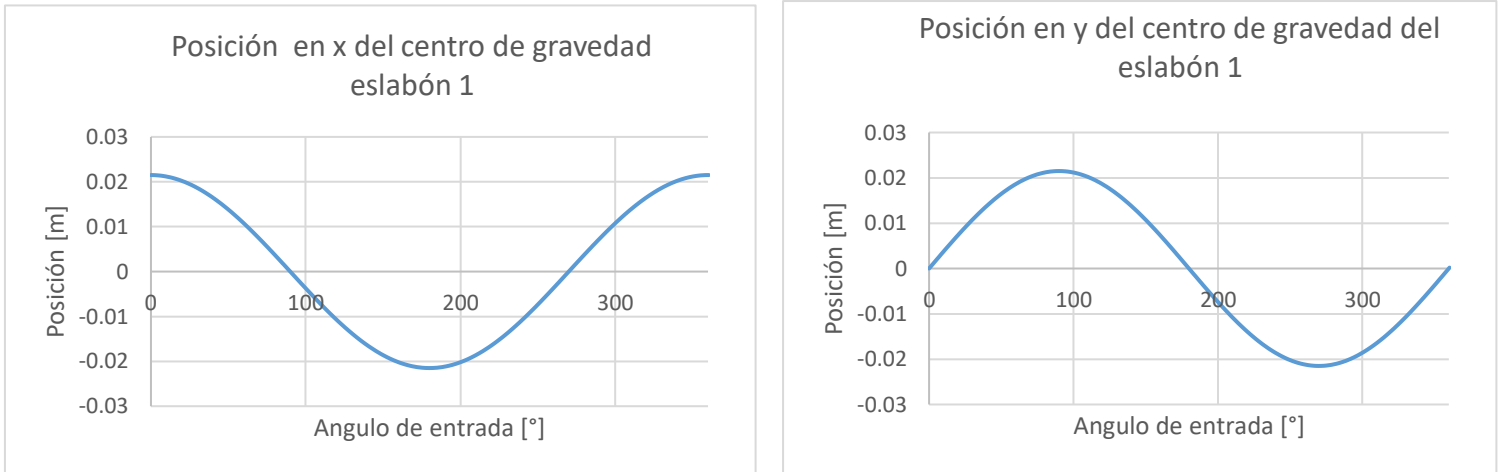


Figura 44. Posición, del centro de gravedad eslabón 1

El análisis de velocidad del eslabón 1 realizado en Working Model sobre el eje X dio como resultado 0.2702 m/s, para el mismo cálculo se obtuvo un resultado en MATLAB 2019b de 0.26998 m/s. Derivado de esto, el error calculado es de 0.08% por lo tanto el cálculo es correcto ya que el valor es menor al 5%. Al realizar el análisis en el eje Y se obtienen los mismos resultados teniendo el mismo porcentaje de error que en el eje X, por lo cual se determina que el cálculo es correcto.

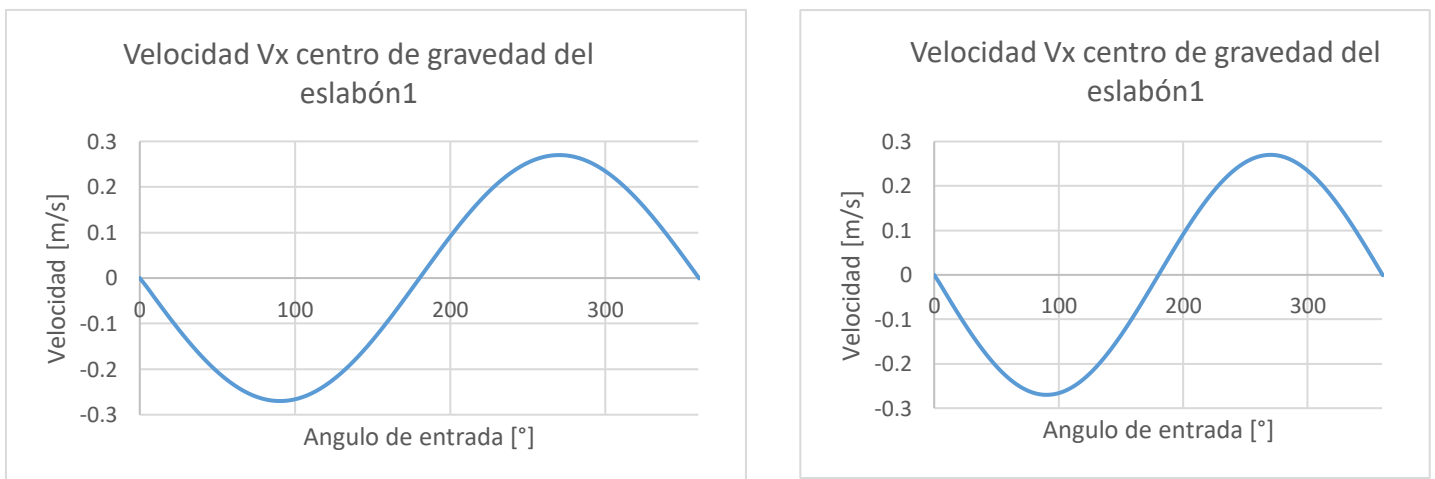


Figura 44. Velocidad del centro de gravedad eslabón 1



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

El valor máximo de la aceleración obtenido en el análisis de Working Model sobre el eje X para el eslabón 1 fue de  $3.3907 \text{ m/s}^2$  al realizar el mismo análisis en MATLAB 2019b este alcanzó un valor máximo de  $3.395 \text{ m/s}^2$  dando como consecuencia un error del 0.12%, por lo tanto, el cálculo es correcto ya que es menor a 5%. En el eje Y la aceleración toma los mismos valores del eje X por lo tanto el cálculo en el eje Y es correcto.

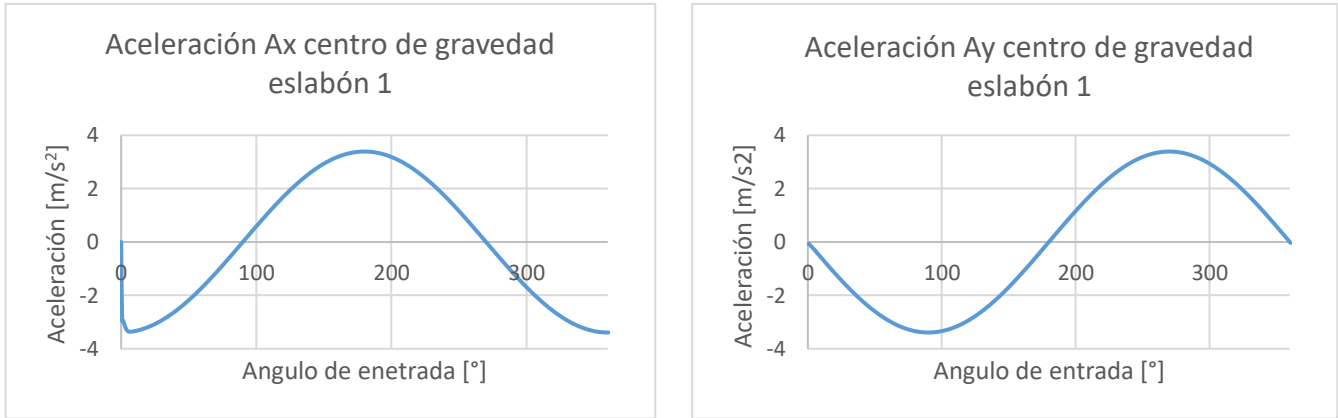


Figura 45. Aceleración centro de gravedad eslabón 1

El siguiente análisis de MATLAB 2019b vuelve a ser nuevamente sobre el eslabón dos, pero tomando el centro de gravedad como referencia para obtener posición, velocidad y aceleración como se observa en la figura 46.

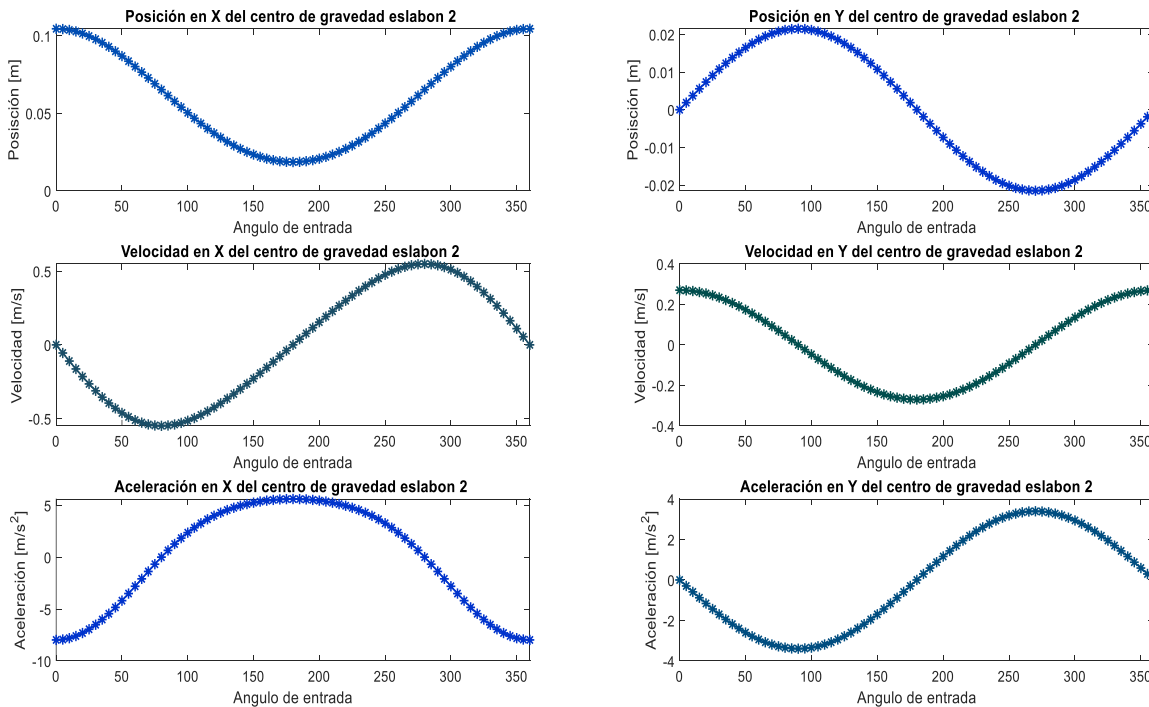


Figura 46. Posición, velocidad y aceleración del centro de gravedad eslabón 2



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

Como se puede observar en la figura 47, en el análisis de posición para el eslabón 2 sobre el eje X se obtuvo como resultado mediante Working Model un valor de 0.1045 m mientras que en MATLAB 2019b se obtiene el mismo resultado obteniendo un porcentaje de error igual a 0%, lo que respalda que el cálculo es correcto. Para el análisis de posición del eslabón 2 sobre el eje Y Working Model toma un valor de 0.0215 tanto en Working Model como en MATLAB 2019b, teniendo como consecuente un porcentaje de error de 0% respaldando que el cálculo es correcto.

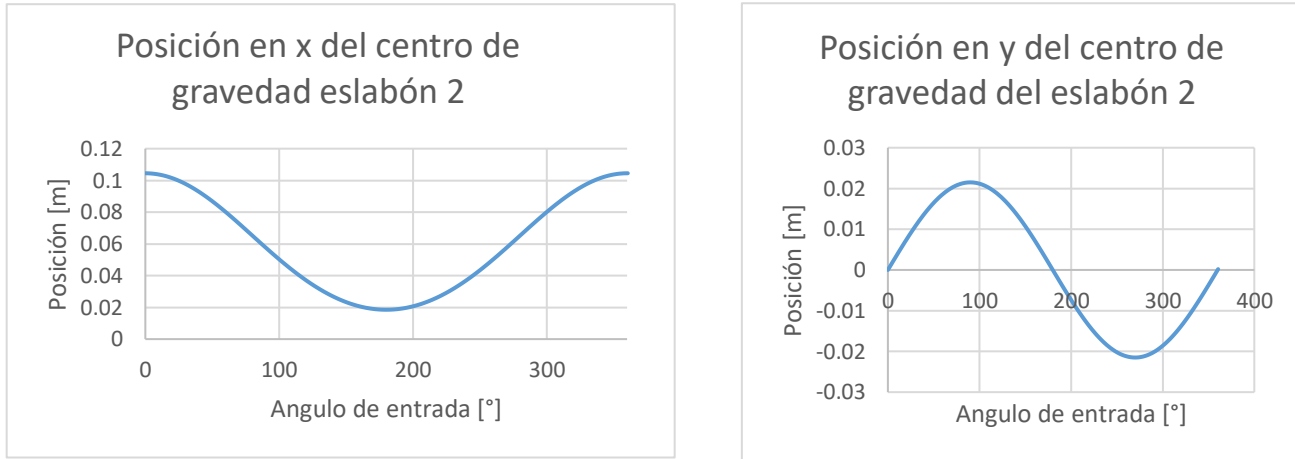


Figura 47. Posición del centro de gravedad eslabón 2

Para la velocidad del centro de masa del segundo eslabón sobre el eje x se obtuvo un valor en Working model de 0.5489 m/s, al desarrollar el mismo calculo en MATLAB 2019b se obtuvo un valor de 0.5493 m/s. El error calculado fue de 0.09% por lo que el cálculo es correcto ya que es menor al 5%. En el análisis de velocidad del eslabón 2 sobre el eje Y se obtuvo un valor de 0.2699 m/s en Working Model, el mismo cálculo realizado en MATLAB 2019b obtuvo un valor de 0.2701 y por lo tanto un error del 0.07% siendo menor al 5%.

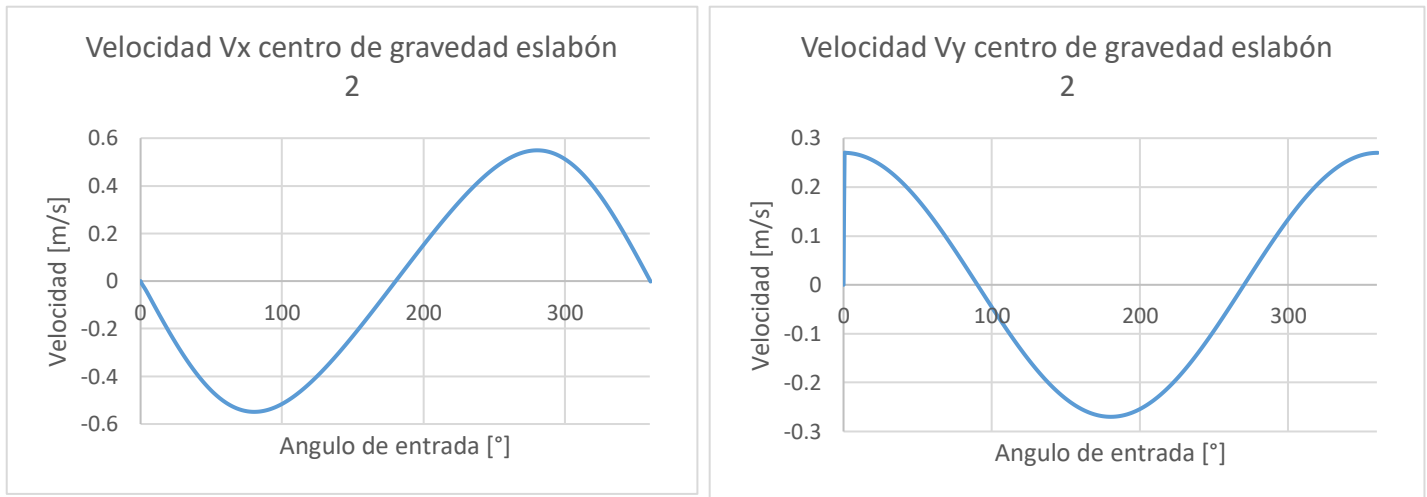


Figura 48. Velocidad del centro de gravedad eslabón 2



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

El valor máximo de la aceleración obtenido en el análisis del centro de gravedad del eslabón 1 sobre el eje X alcanzó un valor de  $5.5971 \text{ m/s}^2$  en Working Model, mientras que en el análisis realizado en MATLAB 2019b se obtuvo un valor máximo de  $5.603 \text{ m/s}^2$  dando como consecuencia un error del 0.1%, por lo tanto, el cálculo es correcto ya que está por debajo del 5%. Para el análisis de aceleración del eslabón 2 sobre el eje Y se obtuvo un valor de  $3.3907 \text{ m/s}^2$  en Working Model, mientras que en el análisis realizado en MATLAB 2019b alcanzó un valor máximo de  $3.395 \text{ m/s}^2$  dando como consecuencia un error del 0.12%, por lo tanto, el cálculo es correcto ya que está por debajo del 5%.

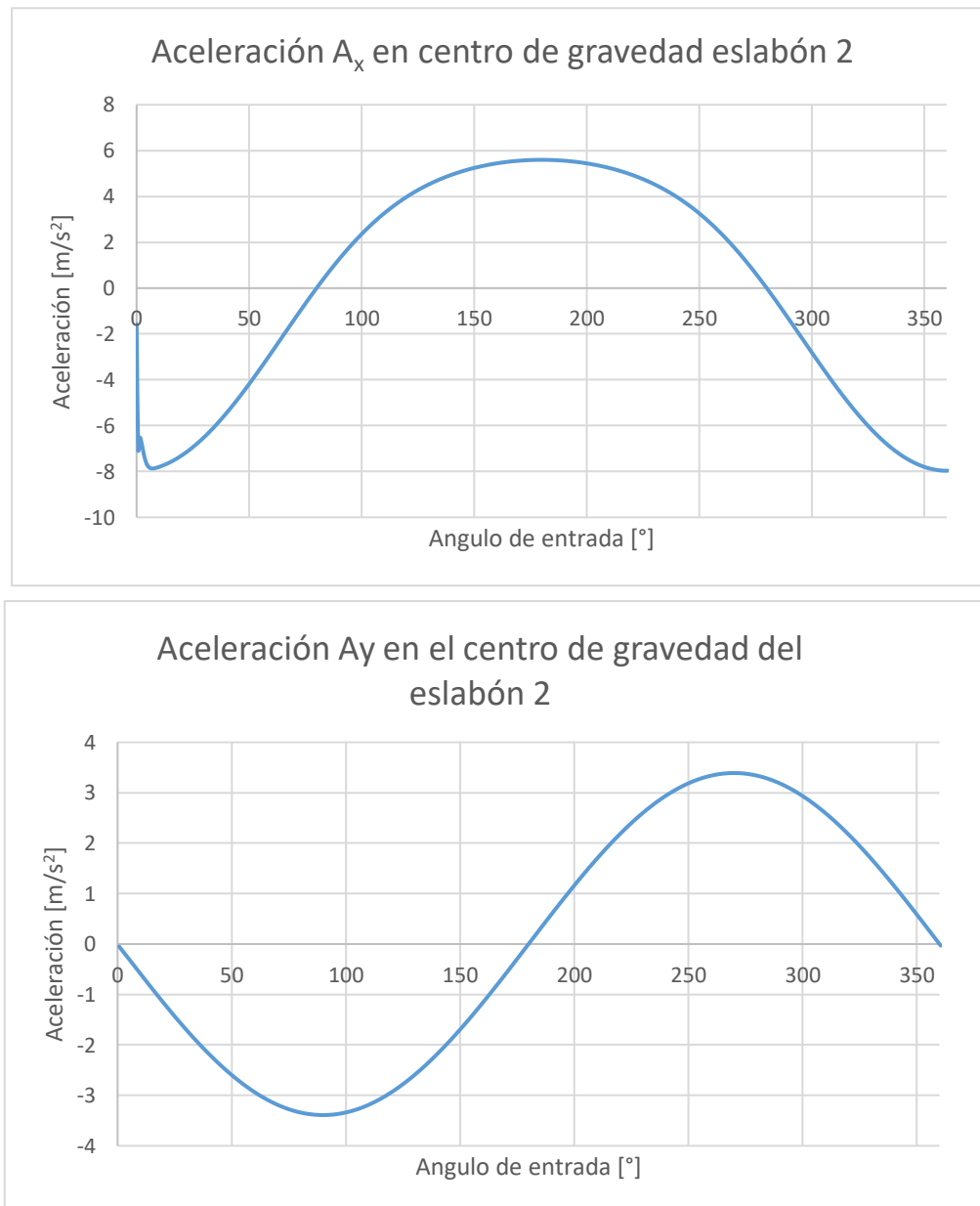


Figura 49. Aceleración del centro de gravedad eslabón 2





TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

Cómo se puede observar en la Figura 50 el cálculo del par para el eslabón 2 tomo un valor en Working Model de 0.0008876 Nm, Por otro lado, el par calculado para el eslabón 2 en MATLAB fue de 0.0008801 Nm, al calcular el error este tuvo un porcentaje de 0.8% siendo menor al 5% comprobando que el cálculo es correcto.

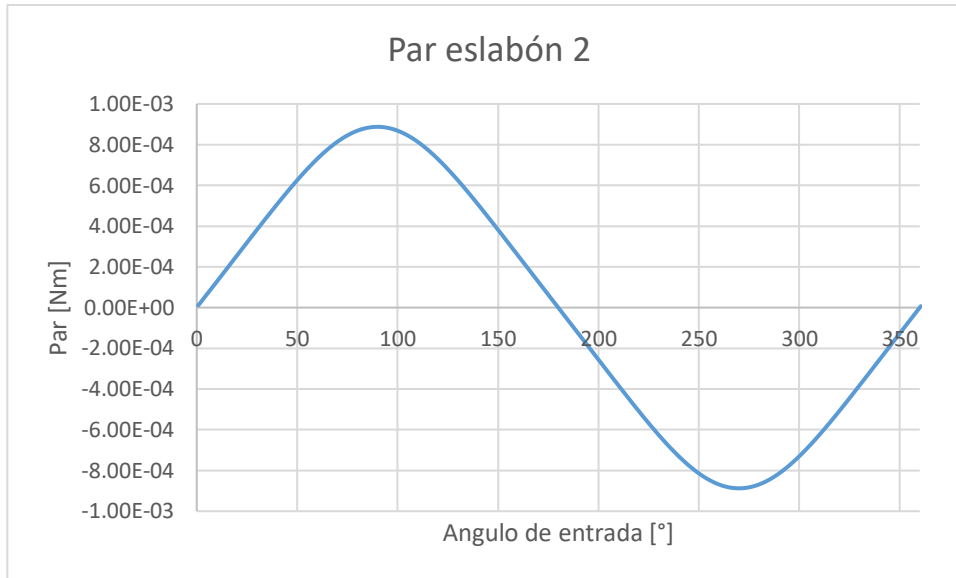


Figura 50. Par del eslabón en Working model

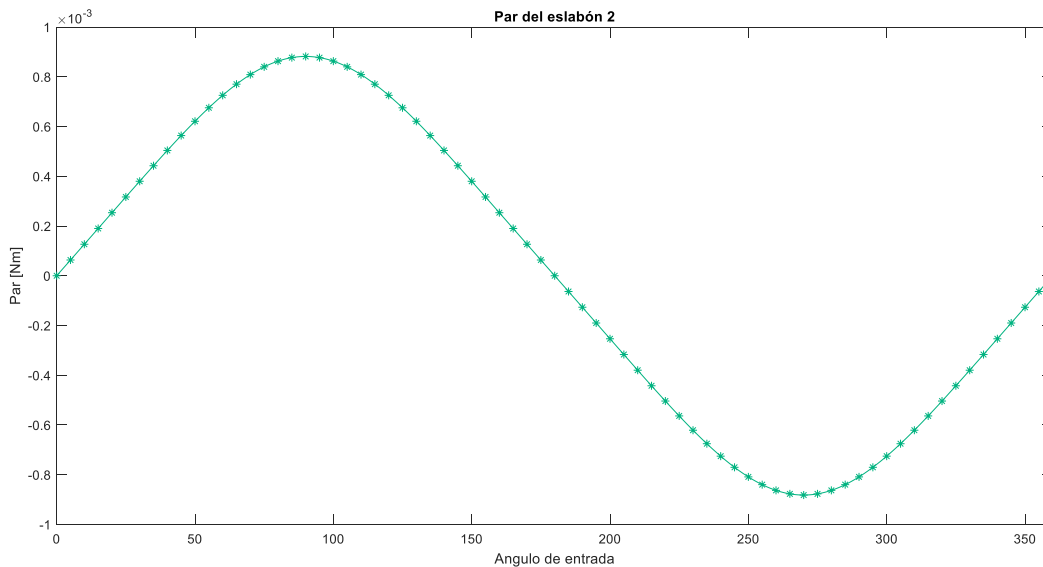


Figura 50. Par eslabón 2



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



El par calculado para el motor es el que se presenta a continuación en la Figura 51:

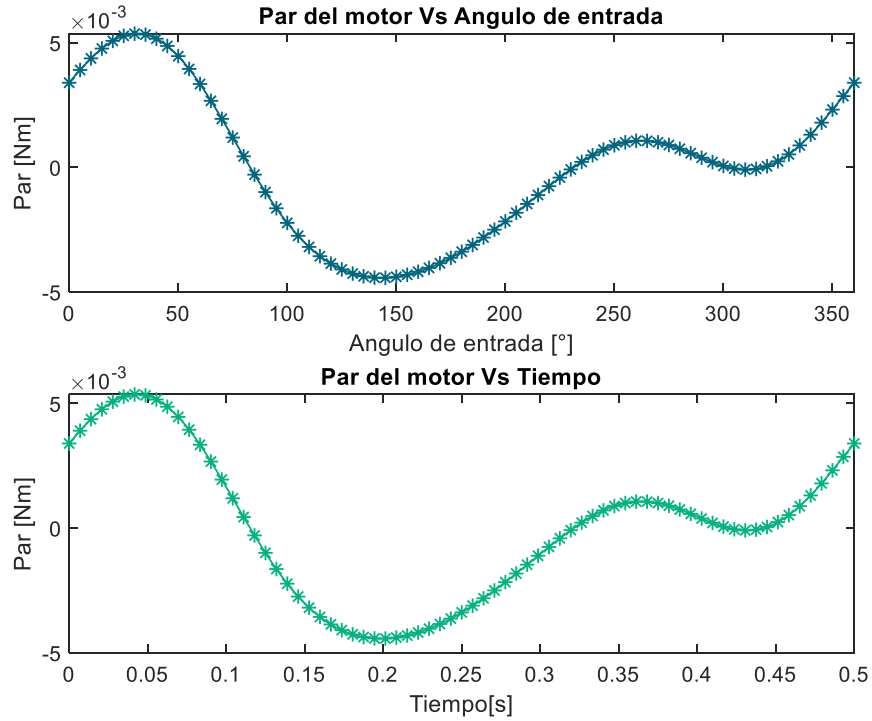


Figura 51. Par necesario para el motor según MATLAB

Este cálculo se verifica con Working Model y se presenta en la Figura 52.

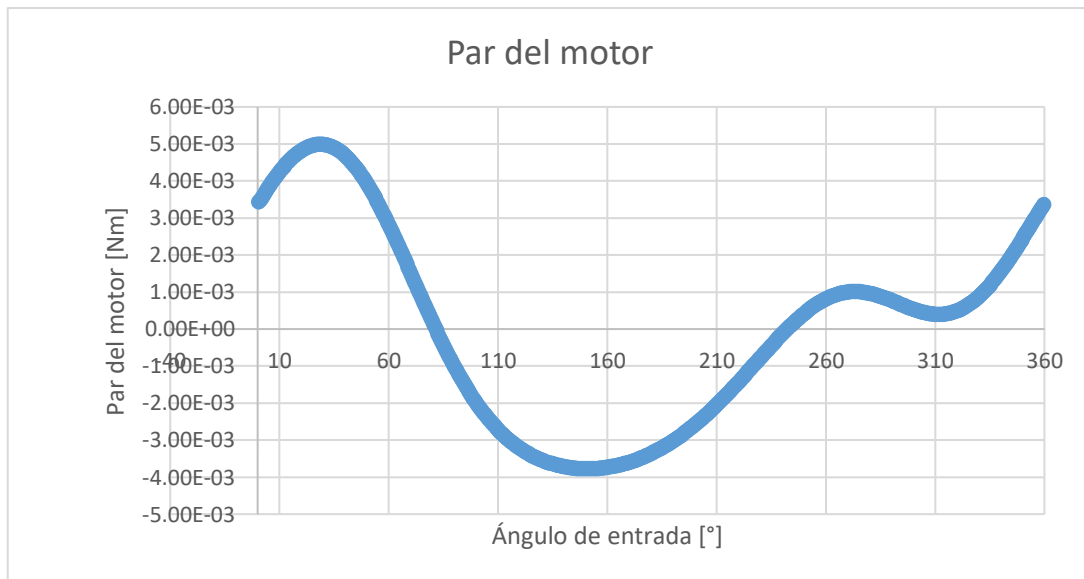


Figura 52. Par del motor en Working model



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

### 7.2.6.3 Selección del motor

Los motores están sometidos a distintos tipos de cargas (par con cambio abrupto, par que cambia con el tiempo y par constante), el tipo de carga que presenta el mecanismo biela manivela es un par constante el cual fue calculado anteriormente, tomando en cuenta un factor de seguridad de 3 para asegurar el funcionamiento del mecanismo. En este caso el torque con factor de seguridad es de 0.015 Nm. Otro criterio para la selección del motor es el precio ya que se buscó que fuera eficiente y barato.

Es necesario saber sobre qué tipo de motor se va a realizar la búsqueda aunado a las especificaciones anteriores, el tipo de proyecto y propósito de éste se llegó a la conclusión de que el motorreductor es la mejor opción para implementar el mecanismo biela manivela.

Los motorreductores son mecanismos que regulan la velocidad de motores eléctricos, haciéndolos trabajar de manera constante en un cierto periodo tiempo. Están conformados por una serie de engranajes que forman parte de la cadena cinemática, funcionando sobre las piezas giratorias.

Su principal objetivo es lograr variar la velocidad inicial a otra de menor magnitud, sin que el mecanismo lo resienta. Otra característica que poseen los motorreductores es el sistema encargado de ajustar la potencia mecánica de un sistema.

Para seleccionar el motor, previamente se tuvo que reunir información de los proveedores para detectar cuáles son las características que deben tomarse en cuenta para su elección, así como el tipo de motores que hay en existencia en varias marcas y modelos.



*Figura 53. Motorreductor*

En este caso el motor seleccionado es el motorreductor de Arduino su Datasheet se encuentra en el ANEXO NO. 3 DataSheet Motor.



#### 7.2.6.4 Diseño del eje

Los ejes son elementos que se utilizan para transmitir potencia, regularmente los ejes están sometidos a cargas combinadas de torsión, flexibilidad y cargas axiales.

El propósito de este cálculo es determinar el diámetro adecuado del eje para comprobar que la rigidez y resistencia son correctas cuando el eje transmite potencia en diferentes condiciones para operar y aplicar carga. En este caso se busca que el eje tenga una sección circular y no sea hueco.

Para el diseño del eje se utilizó la teoría de esfuerzo cortante máximo.

La ecuación que describe la fórmula de la potencia es la ecuación (11).

$$P = \omega T \left[ \text{Hp o } \frac{\text{Joules}}{\text{s}} \right] \quad (11)$$

**Donde:**

- P = Potencia.
- $\omega$  = Velocidad angular.
- T = Torque.

El esfuerzo cortante máximo se define como lo muestra la ecuación (12)

$$\tau_{max} = \frac{\tau C}{J} \quad (12)$$

**Donde:**

$\tau$  = Esfuerzo cortante.

$J = \frac{\pi}{2} C^4$  Momento polar de inercia.

C = Radio exterior.

Donde:

$F_s = 3$

Despejando y sustituyendo el valor del momento polar de inercia ecuación (13) se obtiene lo siguiente:

$$\frac{\tau}{T} = \frac{1}{\frac{\pi}{2} C^3} \quad (13)$$



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



$$\frac{\tau}{T} = \frac{1}{\frac{\pi}{2} C^3}$$

Por lo tanto, la fórmula para calcular el radio de un eje sólido es la mostrada en la ecuación (14):

$$C = \sqrt[3]{\frac{2T}{\pi\tau}} \quad (14)$$

Partiendo de los siguientes valores se calculó el eje:

$$T = 0.015 \text{ Nm con factor de seguridad}$$

Considerando a  $C = 0.002501 \text{ m}$

$$\tau = \frac{TC}{\frac{\pi}{2} C^4} = \frac{(0.015 \text{ Nm})(0.002501 \text{ m})}{\frac{\pi}{2}(0.002501 \text{ m})^4} = 610422.1818 \text{ Pa}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación se obtiene un radio de 2mm.

$$C = \sqrt[3]{\frac{2T}{\pi\tau}} = \sqrt[3]{\frac{2(0.015 \text{ Nm})}{\pi \left(610422.1818 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)}} = 2 \times 10^{-3} \text{ m} = 2 \text{ mm}$$

Por tal razón el diámetro del eje es de 4 mm. Para generar la figura dentro del eje para que permita el ensamble con el motor se tomaron en cuenta las medidas del eje que ya incluye el motor de Arduino; estas medidas se encuentran descritas en el ANEXO NO. 3 DataSheet Motor.



**7.2.6.5 Selección del material**

Para seleccionar correctamente un material existen diferentes métodos, pero el que se decidió seguir para seleccionar los materiales del SM fue desarrollado por Ashby. Éste es un método de selección de materiales que consta de 4 etapas para llegar a la selección final de un material; a continuación, se describirán sus etapas:

1. Restricción: Esta etapa se divide en dos las restricciones negociables las cuales son características no funcionales del material como color, precio, tiempo de manufactura; las restricciones no negociables son propiedades que posee el material como esfuerzo máximo, durabilidad, aislamiento térmico etc. éstas restricciones son la base para la búsqueda del material a utilizar.
2. Filtrado: Tomando en cuenta las restricciones no negociables, es decir las propiedades que se requieren que el material seleccionado cumpla, se hacen los cálculos correspondientes a las restricciones seleccionadas, en este caso se realizará el cálculo de esfuerzos.
3. Ranqueo: En el Ranqueo se realizan gráficas donde es posible tomar en relación las diferentes propiedades o factores de los materiales. Estas gráficas tienen como objetivo comparar los materiales seleccionados en el filtrado para seguir seleccionado los materiales que cumplan las características de las gráficas.
4. Documentación: Esta última etapa tiene como objetivo lograr hacer un estudio más profundo sobre el material seleccionado para hacer una comparación con el material actual para justificar su selección.

Para empezar, se deben plantear la restricciones, funciones, objetivos y variables libres del sistema, estos se organizarán en la Tabla 21:

*Tabla 21. Restricciones, funciones, objetivos y variables libres para selección del material*

FUNCIÓN	ESLABÓN
<b>RESTRICCIÓN</b>	1. La longitud se encuentra definida
	2. La viga debe soportar fuerzas y torques del motor con un factor de seguridad
	3. El material no debe ser corrosivo
<b>OBJETIVOS</b>	Minimizar la masa del eslabón
<b>VARIABLES LIBRES</b>	Elección del material

Al inicio del proyecto se planteó un módulo de elasticidad aproximado de  $E \approx 1.7$  a  $2.8$  GPa ya que el material utilizado para los bloques didácticos es el plástico ABS, de acuerdo con esto puede utilizarse un Diagrama de barras para la selección del material. Este diagrama se muestra en la Figura 54 :

**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

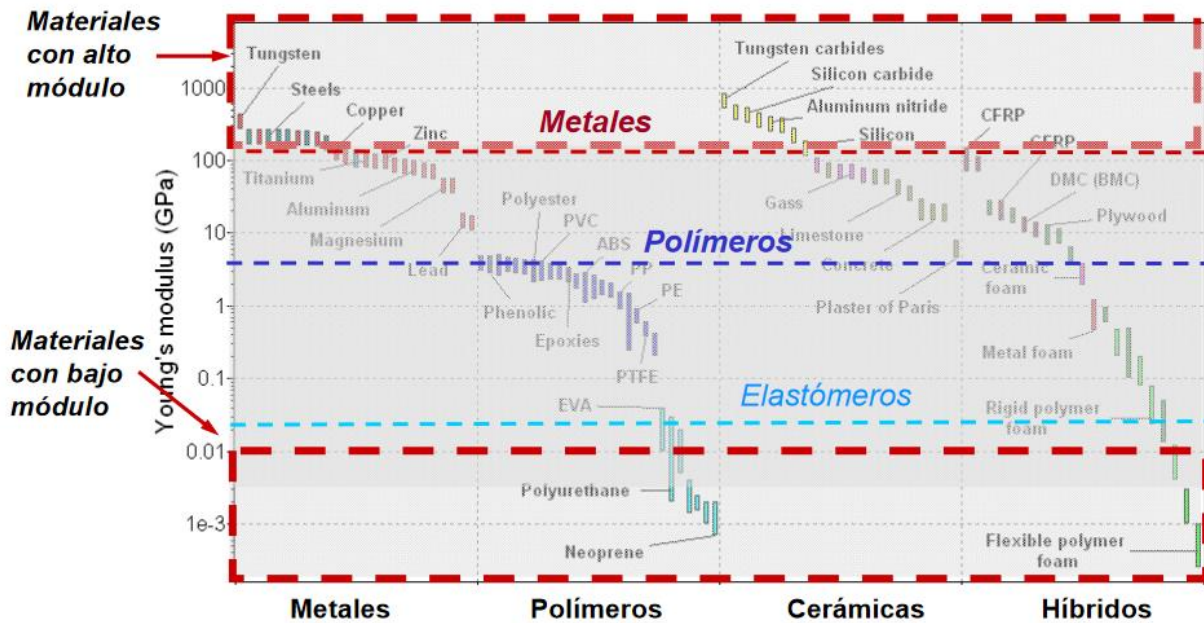


Figura 54. Metales, polímeros, cerámicas, híbridos [31]

Sin embargo, esta restricción arroja 9661 resultados de polímeros que cumplen con el mínimo del módulo de elasticidad por lo que deben buscarse más restricciones.

Los eslabones pueden analizarse como una viga. Por lo que para aplicar el método de selección de materiales de Ashby se debe considerar la siguiente ecuación:

$$S = \frac{F}{\delta}$$

Esta fórmula se puede igualar a:

$$S = \frac{C_1 EI}{L^3}$$

En donde I es el momento de inercia de la sección transversal de la viga, en este caso de cada uno de los eslabones del mecanismo; E es el módulo de elasticidad.

Por comodidad se considerará la sección transversal cuadrada, resultando el momento de inercia como se muestra a continuación:

$$I = \frac{b^2}{12}$$

Para poder utilizar el método de Ashby es necesario tener una relación de las propiedades del material y la sección transversal del eslabón para poder calcular el índice de rendimiento que será utilizado en las gráficas



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

de Ashby; esto permitirá la selección de un grupo de materiales aptos para la aplicación en este proyecto basándose en el objetivo planteado en la Tabla 21.

Una de las ecuaciones involucradas en la masa del eslabón es la que depende de la densidad del material, siendo la densidad  $\rho$ , L la longitud del eslabón y A el área transversal:

$$m = LA\rho$$

Por lo que al igualar, despejar y simplificar las ecuaciones anteriores se obtiene el índice de rendimiento de reducción de masa, este se muestra en la siguiente ecuación:

$$m \geq \left( \frac{12S}{C_1 EI} \right)^{1/2} \frac{L^3 \rho}{E^2}$$

Esta ecuación está formada por una parte que simboliza las características funcionales geométricas y las que interesan para la selección y que forman el índice del material.

Como el objetivo de esta selección es minimizar el tamaño del eslabón se debe utilizar la inversa de esta parte de la ecuación, la parte que refleja la selección del material:

$$M = \frac{1}{\rho E^2}$$

Esta ecuación representa el índice de rendimiento del material y es que se usará como pendiente en las gráficas que se explican y muestran en el libro *Materials Selection In Mechanical* de Ashby [32], en este caso se usará la gráfica de Densidad contra Módulo de elasticidad que se encuentra en la Figura 55.

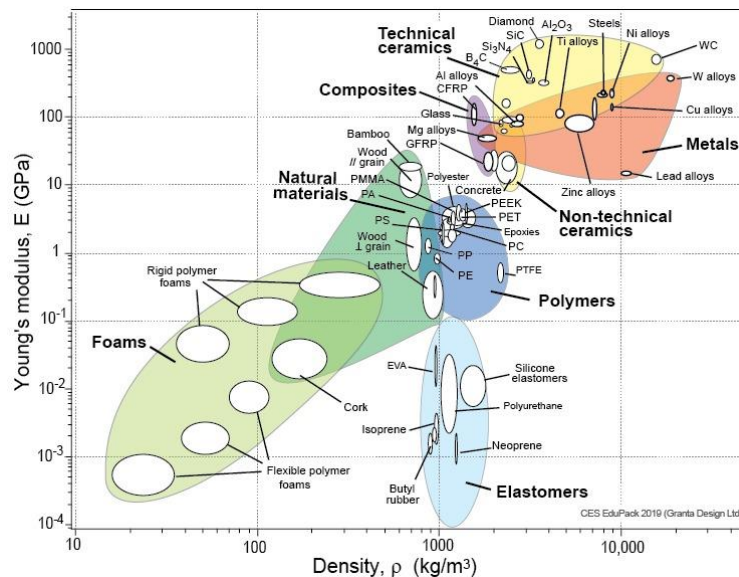


Figura 55. Módulo de Young vs Densidad. Tabla de materiales de nivel 2.



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Estos cuadros y gráficos se basan en la biblioteca de datos de propiedad de materiales de Granta [33] y en la metodología del cuadro de propiedades de materiales desarrollada por el profesor Mike Ashby. Son de uso gratuito en sitios web y publicaciones.

Esta recta se moverá hasta tener un grupo de materiales dentro los que se puedan elegir para después hacer una selección por medio de software y reducir los materiales para después analizarlos con una selección multicriterio AHP.

Ya que con la recta es posible eliminar materiales, según los requerimientos se obtiene un solo resultado por lo que se modifica el valor de la densidad, para también tomar en cuenta polímeros.

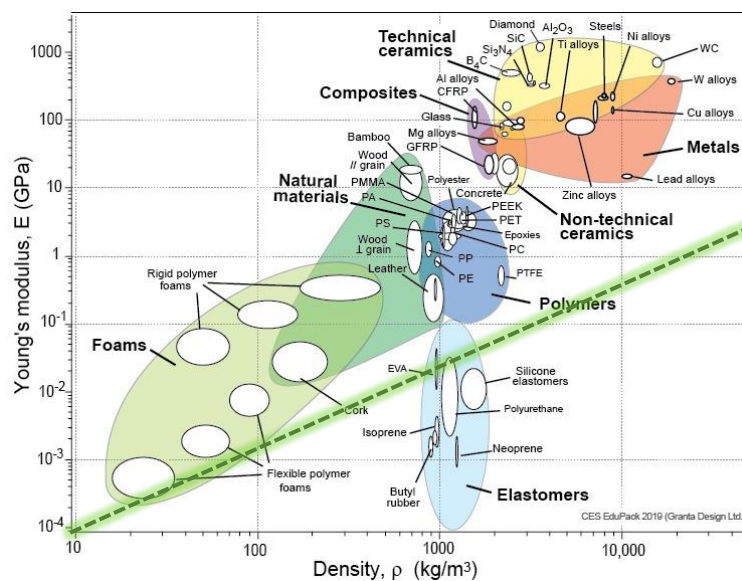


Figura 56. Gráfica de Granta con recta

Existe una página llamada bcn3d [34] con un selector que permite elegir el material más adecuado a la aplicación definida. En este caso los resultados son los siguientes para la base:

*Materiales rígidos y resistentes a los impactos*

Esta es nuestra recomendación de filamento para ti:



**Tough PLA**

- Resistente a los impactos
- Rígido
- Fácil de imprimir



**ABS**

- Resistente a los impactos
- Resistente al calor
- Rígido

Más resistente a los impactos

-Equilibrio entre dureza y rigidez  
-Mejor para impresiones grandes

Figura 57. Resultados para selección del material



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Para elegir el material más factible se aplica el método de selección multicriterio AHP. Los criterios para considerar se enlistan a continuación:

1. Módulo de elasticidad
2. Precio de impresión
3. Densidad
4. Amigable con el medio ambiente

*Tabla 22. Matriz multicriterio AHP para selección del material*

Cr	1	4	3	4
Cr1	1	4	5	2
Cr2	1/4	1	3	4
Cr3	1/5	1/3	1	5
Cr4	1/2	1/4	1/5	1
$\Sigma y$	1.95	5.58	9.20	12.00

Con los datos de la matriz multicriterio se crea la matriz normalizada presentada en

*Tabla 23. Matriz normalizada de selección de material*

Cr	1	2	3	4	$\Sigma x$	CRITERIOS
1	0.513	0.716	0.543	0.167	1.939	Módulo de elasticidad
2	0.128	0.179	0.326	0.333	0.967	Precio
3	0.103	0.060	0.109	0.417	0.688	Densidad
4	0.25641026	0.045	0.022	0.083	0.406	Amigable con el medio ambiente
$\Sigma y$	1.00	1.00	1.00	1.00		

Con los valores en colores se calcula el vector de prioridad de criterios en donde se representa el valor de importancia del criterio para la selección.

*Tabla 24. Vector de prioridad de criterios*

$V\hat{C}_r =$	0.48484584
	0.24168247
	0.17190698
	0.10156471

En la Tabla 25 se presentan las características de los materiales que se usarán para su comparación.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
 UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
 AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



*Tabla 25. Características de los materiales*

	Precio de impresión	Modulo de young	Densidad
<b>PLA</b>	\$ 1.20	3,3 - 3,6 GPa	1.02-1.08 kg/m <sup>3</sup>
<b>ABS</b>	\$ 1.50	1.17 GPa	1,07 kg/m <sup>3</sup>

La solución A será la opción del PLA y ABS será la opción B.

SELECCIÓN DE MATERIAL												
Matrices de criterios para las combinaciones seleccionadas								Vector de prioridad		Vector de ponderación total		
<b>MCr1</b>	A	B		<b>MCr1</b>	A	B	$\Sigma x$		VCr1=	0.5	Atot=	<b>0.463565</b>
A	1	3		A	0.750	0.750	1.5			0.17	Btot=	<b>0.203102</b>
B	0.33333333	1		B	0.250	0.250	0.5		$\Sigma y$	0.67	$\Sigma y$	0.666667
$\Sigma y$	1.33333333	4		$\Sigma y$	1	1						
<b>MCr2</b>	A	B		<b>MCr2</b>	A	B	$\Sigma x$		VCr2=	0.44		
A	1	2		A	0.667	0.667	1.33333333			0.22		
B	0.5	1		B	0.333	0.333	0.66666667		$\Sigma y$	0.67		
$\Sigma y$	1.5	3		$\Sigma y$	1	1						
<b>MCr3</b>	A	B		<b>MCr3</b>	A	B	$\Sigma x$		VCr3=	0.33		
A	1	1		A	0.5	0.5	1			0.33		
B	1	1		B	0.5	0.5	1		$\Sigma y$	0.67		
$\Sigma y$	2	2		$\Sigma y$	1	1						
<b>MCr4</b>	A	B		<b>MCr3</b>	A	B	$\Sigma x$		VCr4=	0.56		
A	1	5		A	0.8333	0.83333333	1.66666667			0.11		
B	0.2	1		B	0.1667	0.16666667	0.33333333		$\Sigma y$	0.67		
$\Sigma y$	1.2	6		$\Sigma y$	1	1						

Como se puede observar en el vector de ponderación total, la solución ganadora es la A. Para los eslabones que soportan la corredera, se usará el material ABS ya que éste resiste más la fricción.



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

### 7.2.6.6 Análisis de esfuerzos

Para el análisis de esfuerzos se crearán los eslabones en 3D en SolidWorks. En la Figura 58 se muestra el mecanismo realizado en 3D en SolidWorks.

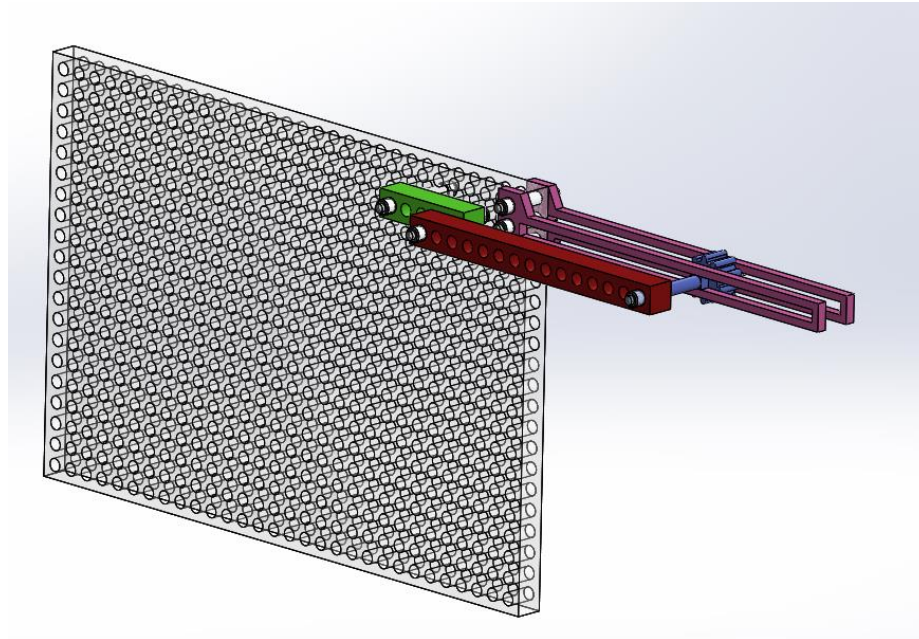


Figura 58. Mecanismo en 3D realizado en SolidWorks

En este apartado lo que se hará es poner el mecanismo en movimiento para que el software grafique los esfuerzos necesarios en cada una de las piezas que conforman el ensamble.

El criterio de máxima tensión de Von Mises se basa en la teoría de Von Mises-Hencky, esta teoría explica que un material dúctil comienza a ceder cuando la tensión de Von Mises es igual al límite de tensión. En la mayoría de los casos, el límite elástico se utiliza como el límite de tensión.

En Ingeniería otro de los conceptos que se emplea es el Factor de Seguridad  $F_s$ , éstos tienen objetivo evitar la falla de los elementos diseñados y construidos y optimizar los diseños.

El factor de seguridad, también llamado coeficiente de seguridad es el cociente resultante entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real al que se verá sometido. Por este motivo, se trata de un número mayor que uno, que indica la capacidad de exceso que tiene el sistema sobre sus requerimientos [35].

En el caso de este análisis SolidWorks puede graficar con colores los valores de tensiones y tomando en el límite de tensión de tracción/ruptura que se establece en las características del material puede definir también el factor de seguridad de la pieza.

Se empezará con el análisis en la manivela, la gráfica de tensiones de Von Misses se presenta a continuación en la Figura 59:



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

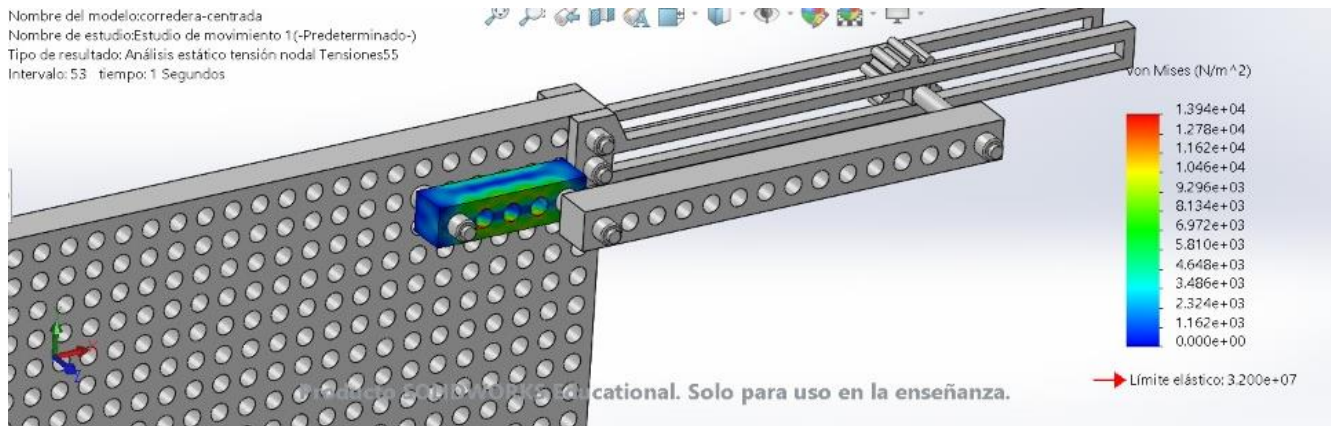


Figura 59. Tensiones de Von Misses en manivela

En este caso se puede observar que el límite elástico del material no es rebasado por las tensiones generadas y presentadas en la gráfica de tensiones de Von Misses de SolidWorks.

También es posible graficas representar por medio de colores el factor de seguridad, el factor de seguridad para la manivela es el presentado en la Figura 60:

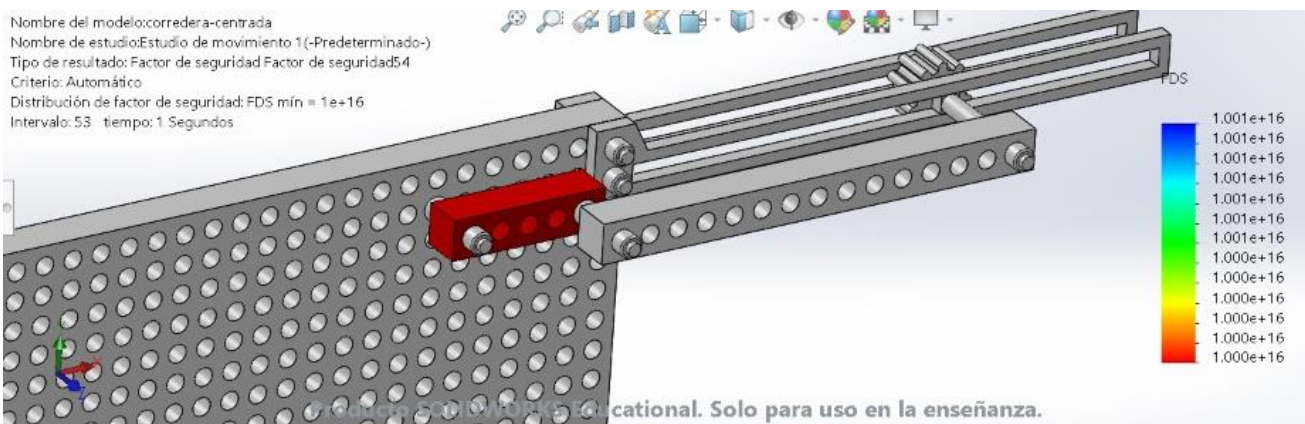


Figura 60. Factor de seguridad en la manivela

En este caso el factor de seguridad es muy grande ya que la diferencia entre la tensión máxima y la requerida son muy diferentes; el color rojo de la pieza a pesar de considerarse como el valor más bajo del factor de seguridad es de  $1 \times 10^{16}$ .

Al igual que en el eslabón anterior, se comprueba que el material y el eslabón diseñado para la biela soporta el movimiento y tensiones generadas mediante el factor de seguridad, éste se muestra en la Figura 61:



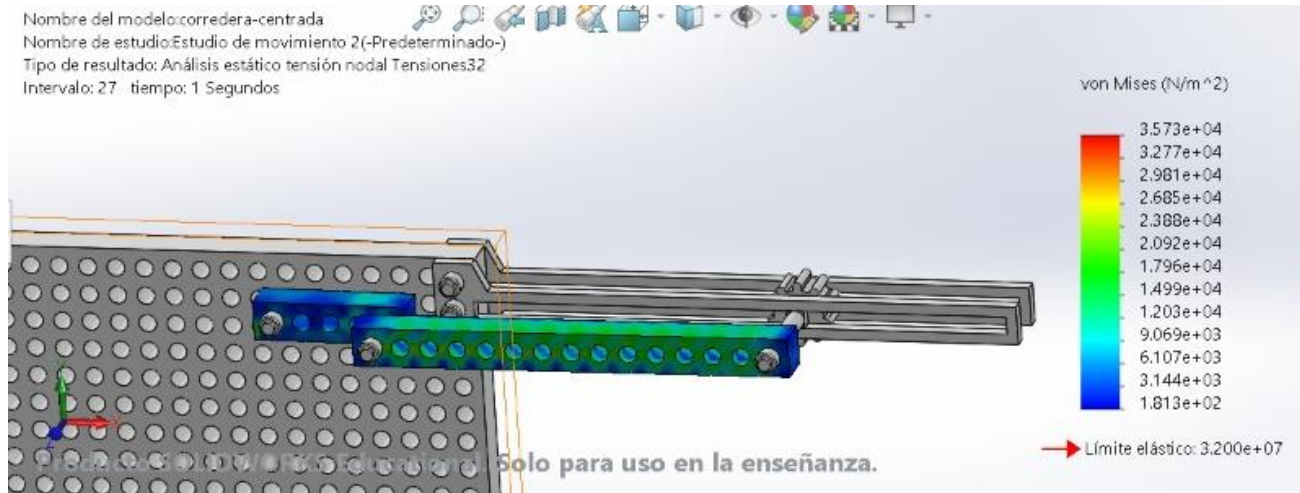


Figura 61. Tensiones de Von Misses manivela

En este caso la tensión máxima alcanzada en la pieza (algunas zonas) es de  $3.56 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ .

De nuevo este cálculo se puede validar con el factor de seguridad de SolidWorks, el cual se muestra en la Figura 62, en donde es posible observar que el factor de seguridad que se obtiene en la mayor parte de esta pieza es de  $8.95 \times 10^2$ .



Figura 62. Factor de seguridad de la manivela

**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

En la Figura 63 se presentan las tensiones generadas en la corredera al realizar el movimiento del motor, la tensión máxima es de  $3.123 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ .

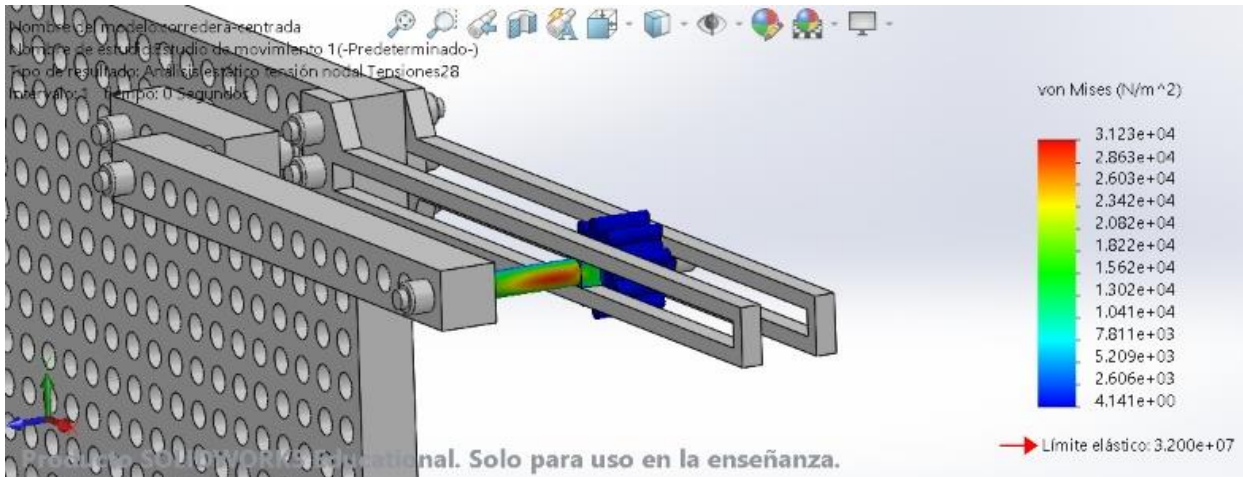


Figura 63. Tensiones de Von Mises en la corredera

Para asegurar el buen funcionamiento de la corredera se verifica con el factor de seguridad, este se muestra en la Figura 64.



Figura 64. Factor de seguridad en la corredera

El factor de seguridad más bajo que se obtiene es de  $1.025 \times 10^3$ .

**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Para el eje que une a la manivela con la biela se obtienen las tensiones mostradas en la Figura 65. Como puede observarse el valor más alto de tensión alcanzada es de  $1.117 \times 10^1 \text{ N/m}^2$ .

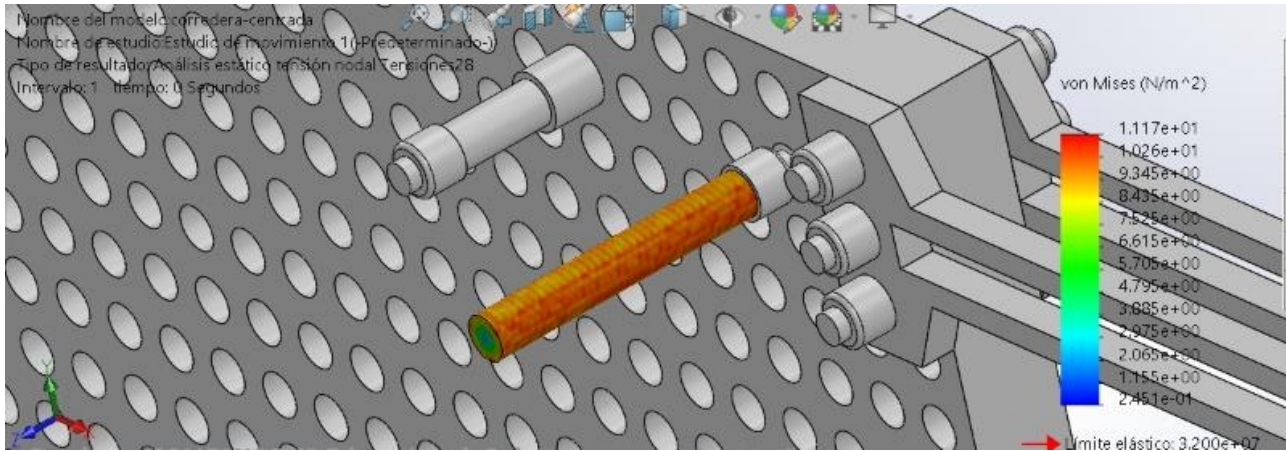


Figura 65. Tensiones de Von Misses en perno

Con estos valores el software presenta el factor de seguridad por zona en el perno, en este caso el factor de seguridad es de  $2.866 \times 10^6$ .

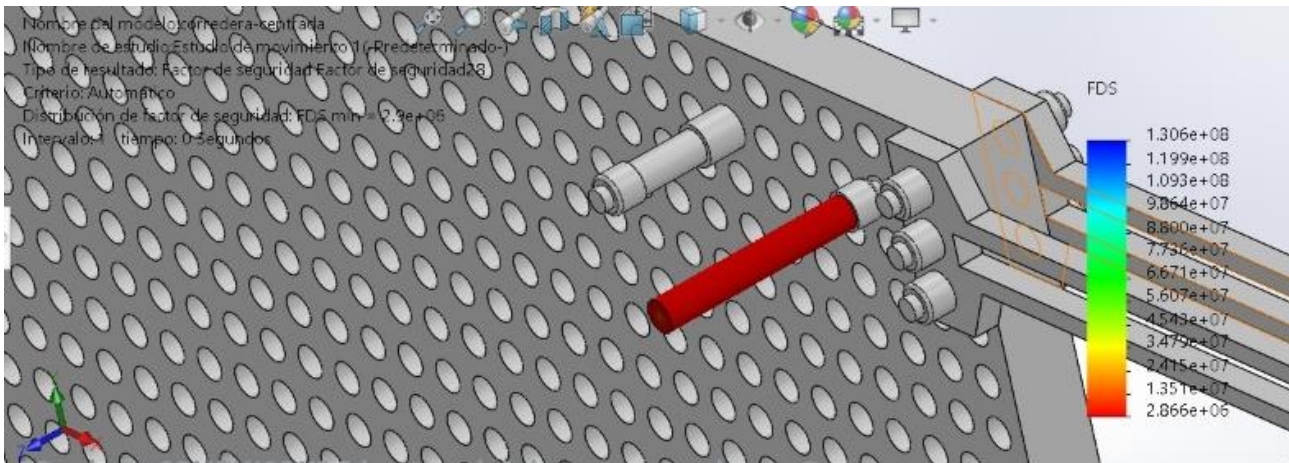


Figura 66. Factor de seguridad en perno





#### *7.2.6.7. Selección del método de manufactura*

Los procesos de manufactura se determinan tomando en cuenta dos factores, que sea completamente funcional y económicamente viable, en la mayoría de los casos habrá una discordancia entre estos dos puntos de vista, pero se debe de buscar un punto de equilibrio para obtener un producto que cumpla requerimientos funcionales y no tenga un precio elevado.

Los procesos de manufactura se dividen en 3 familias, los procesos de conformado, los procesos de unión y acabados. Para una correcta selección del proceso de manufactura se requiere hacer una interpretación general de lo que se necesita construir con dichos procesos, se debe establecer la función que debe tener el proceso en relación con las familias de procesos, seguidamente se deben de tomar en cuenta las restricciones con las que se desea manufacturar (material, forma, tamaño, precisión, etc.), posteriormente se tiene que establecer el objetivo del proceso que se refiere al tiempo de maquinado, precio y calidad del mismo, por último se toman en cuenta las variables libres que se refieren a la secuencia de proceso.

Por este motivo se concluye que el proceso de manufactura adecuado para la construcción de las piezas del mecanismo biela-manivela es la impresión 3D ya que es más barata que la fundición e inyección de polímeros además de ser más rápida y brindar mejor precisión. Aunado a esto es importante mencionar que la impresión 3D es compatible con el material seleccionado para la construcción de las piezas del mecanismo.

La impresión 3D es un conjunto de tecnologías para el propósito de fabricación de piezas tridimensionales por adición colocando capas sucesivamente de un determinado material mediante el diseño de un modelo digital. Por lo tanto, se trata de un proceso en el que se crea un objeto físico en tres dimensiones mediante un modelo digital por medio de una impresora 3D, que pueden usar diferentes tecnologías y materiales para ir superponiendo capas hasta crear una réplica perfecta del modelo digital.

La impresión 3D funciona a través de un software, el hardware encargado de imprimir y el material, creando sinergia entre estos. El método de impresión 3D superpone capas de material de abajo hacia arriba.

Previo al proceso, el software es el encargado de dividir el modelo digital en capas finas como el diámetro del material de salida. Para cada capa, la impresora se va desplaza sobre el plano para ir liberando material sobre las coordenadas correspondientes y así ir formando la figura en tres dimensiones e idéntica a la diseñada en mediante el software.



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**7.2.6.8 Acondicionamiento de energía del motor**

Para conectar el motor seleccionado se debe determinar si los pines de la tarjeta ARDUINO trabajan en el mismo rango de valores de voltaje, esto es así, ya que los pines trabajan a un voltaje de 5V. En este caso el valor a acondicionar es la corriente. Al hacer uso del motor modelo, se requerirán 250 mA. De acuerdo con el DataSheet del Arduino UNO, se puede observar que la corriente que puede brindar es de 20 mA.

En este caso será necesario elegir los componentes electrónicos que ayudarán a dar la corriente suficiente para el funcionamiento del motor. Para este proyecto resaltan dos opciones para la etapa de potencia, a continuación, se muestran las características de cada una de estas opciones.

Tabla 26. Comparación de características entre BJT Y MOSFET

CARACTERÍSTICA	BJT	MOSFET	L298N
CORRIENTE	✓	✓	✓
PRECIO	\$ 4.0	\$ 23.0	\$28
ACCESIBILIDAD	✓	✓	✓
ADECUACIÓN AL SOFTWARE	✓	✓	✗

En un motor de baja potencia como el seleccionado no se aprovecharía la capacidad de los Transistores MOSFET, así que en este caso es suficiente usar un transistor BJT 2n2222, ya que soporta la corriente que solicita el motor para su funcionamiento.

A continuación, se muestran las matrices de selección

Tabla 27. Matriz de comparación de criterios

Cr	1	2	3	4
Cr1	1	5	4	3
Cr2	1/5	1	1/3	4
Cr3	1/4	3	1	1/4
Cr4	1/3	1/4	4	1
Sy	1.78	9.25	9.33	8.25

Tabla 28. Matriz normalizada

Cr	1	2	3	4	Σx	Criterio
1	0.56075	0.54054	0.42857	0.36364	1.893496	1. Corriente
2	0.11215	0.10811	0.03571	0.48485	0.740820	2. Precio
3	0.14019	0.32432	0.10714	0.03030	0.601957	3. Accesibilidad
4	0.18692	0.02703	0.42857	0.12121	0.763726	4. Adecuación al software
SY	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000		



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Con los resultados anteriores se obtiene el vector de prioridad de criterios y con ayuda de las matrices por criterio que se mostrarán a continuación se llegará a la propuesta solución.

*Tabla 29. Matrices de comparación de soluciones por criterio*

Matrices de criterios para las combinaciones seleccionadas					Vector de prioridad						
MCr1	A	B	C		MCr1	A	B	C	Σx	VCr1=	0.33333333
A	1	1	1		A	0.33333	0.33333	0.33333	1.00000	0.33333333	0.33333333
B	1	1	1		B	0.33333	0.33333	0.33333	1.00000	0.33333333	0.33333333
C	1	1	1		C	0.33333	0.33333	0.33333	1.00000	Σy	1
Σy	3	3	3		Σy	1	1	1			
MCr2	A	B	C		MCr2	A	B	C	Σx	VCr2=	0.62322473
A	1	3	4		A	0.63157895	0.66666667	0.57142857	1.869674	0.23948761	0.13728766
B	0.3333	1	2		B	0.21052632	0.22222222	0.28571429	0.718463	Σy	1
C	0.25	0.5	1		C	0.15789474	0.11111111	0.14285714	0.411863		
Σy	1.5833	4.5	7		Σy	1	1	1			
MCr3	A	B	C		MCr3	A	B	C	Σx	VCr3=	0.60338346
A	1	3	4		A	0.63157895	0.42857143	3/4	1.81015	0.13862782	0.25798872
B	1/3	1	1/3		B	0.21052632	0.14285714	0	0.415883	Σy	1
C	1/4	3	1		C	0.15789474	0.42857143	0.1875	0.773966		
Σy	1 4/7	7	5 1/3		Σy	1	1	1			
MCr4	A	B	C		MCr4	A	B	C	Σx	VCr4=	0.63334572
A	1	3	5		A	0.65217391	0.69230769	0.55555556	1.900037	0.26049796	0.10615632
B	1/3	1	3		B	0.2173913	0.23076923	0.33333333	0.781494	Σy	1
C	1/5	1/3	1		C	0.13043478	0.07692308	0.11111111	0.318469		
Σy	1.5333	4.333333	9		Σy	1	1	1			

Con esto se obtiene la ponderación por solución:

*Tabla 30. Vector de ponderación total para selección de componente de etapa de potencia*

Vector de ponderación total	
Atot=	0.484944
Btot=	0.272745
Ctot=	0.242311
Σy	1.000000



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
 UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
 AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



Los resultados de filtrado en la página de Mouser Electronics México [36] se presentan en la siguiente Figura 67.

<a href="#">Productos</a> <a href="#">Fabricantes</a> <a href="#">Servicios y herramientas</a> <a href="#">Recursos técnicos</a> <a href="#">Ayuda</a> <a href="#">Cuenta y pedidos</a> 0				
<a href="#">Volver a resultados de la búsqueda</a> <a href="#">Eliminar</a> <a href="#">Añadir al carrito</a> <a href="#">Agregar a proyecto</a> <input type="text" value="Nuevo proyecto"/>				
<b>Información del producto:</b>				
<b>Imagen:</b>				
<b>Verificar todos:</b> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>N.º de artículo de Mouser:</b>	494-2N2222AE3	494-JAN2N2222A	494-JANTX2N2222A	494-JANTXV2N2222A
<b>N.º de artículo del fabricante:</b>	2N2222Ae3	JAN2N2222A	<u>Jantx2N2222A</u>	Jantxv2N2222A
<b>Fabricante:</b>	Microchip	Microchip	Microchip	Microchip
<b>Descripción:</b>	Transistores bipolares - Transistores de empalme bipolar (BJT) BJTs	Transistores bipolares - Transistores de empalme bipolar (BJT) BJTs	Transistores bipolares - Transistores de empalme bipolar (BJT) BJTs	Transistores bipolares - Transistores de empalme bipolar (BJT) BJTs
<b>Hoja de datos:</b>	<a href="#">Hoja de datos</a>	<a href="#">Hoja de datos</a>	<a href="#">Hoja de datos</a>	<a href="#">Hoja de datos</a>
<b>RoHS:</b>	Detalles	No	No	No
<b>Especificaciones</b>				
<b>Tensión VCBO colector-base:</b>	75 V	75 V	75 V	75 V
<b>Máx. voltaje VCEO colector-emisor:</b>	50 V	50 V	50 V	50 V
<b>Configuración:</b>	Single	Single	Single	Single
<b>Voltaje VEBO emisor-base:</b>	6 V	6 V	6 V	6 V
<b>Paquete / Cubierta:</b>	TO-18-3	TO-18-3	TO-18-3	TO-18-3
<b>Empaquetado:</b>	Bulk	Bulk	Bulk	Bulk
<b>Tecnología:</b>	Si	Si	Si	Si
<b>Marca:</b>	Microchip Technology	Microchip Technology	Microchip Technology	Microchip Technology
<b>Voltaje de saturación colector-emisor:</b>	1 V	1 V	1 V	300 mV
<b>Corriente continua del colector:</b>	800 mA	-	-	-
<b>Estilo de montaje:</b>	Through Hole	Through Hole	Through Hole	Through Hole
<b>Polaridad del transistor:</b>	NPN	NPN	NPN	NPN
<b>Colector DC/Ganancia Base hFE Mínima:</b>	30	-	75 at 1 mA, 10 VDC	75 at 1 mA, 10 VDC
<b>Producto para ganar Ancho de banda fT:</b>	100 MHz	-	-	-
<b>Corriente CC máxima de colector:</b>	800 mA	800 mA	800 mA	800 mA
<b>Temperatura de trabajo máxima:</b>	+ 200 C	+ 200 C	+ 200 C	+ 200 C
<b>Temperatura de trabajo mínima:</b>	- 65 C	-	- 65 C	- 65 C
<b>Dp - Disipación de potencia :</b>	500 mW	-	500 mW	500 mW
<b>Tipo de producto:</b>	BJTs - Bipolar Transistors	BJTs - Bipolar Transistors	BJTs - Bipolar Transistors	BJTs - Bipolar Transistors
<b>Cantidad de Paquete Estándar:</b>	1	1	1	1
<b>Subcategoría:</b>	Transistors	Transistors	Transistors	Transistors
<b>Máx. ganancia de CC hFE:</b>	-	-	325 at 1 mA, 10 VDC	325 at 1 mA, 10 VDC
<b>Información del pedido</b>				
<b>Existencias:</b>	137	107	101	70
<b>En pedido:</b>	430	820	12262	390
<b>Plazo de entrega de fábrica:</b>	Ver fechas de entrega 30 Semanas	Ver fechas de entrega 37 Semanas	Ver fechas de entrega 14 Semanas	Ver fechas de entrega 30 Semanas
<b>Precio:</b>	1: \$4.63 100: \$4.29	1: \$2.96 100: \$2.76	1: \$3.38 100: \$3.15	1: \$4.68 100: \$4.34

Figura 67. Transistor seleccionado



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

El transistor que se utilizará será el 2n2222A, un transistor muy común y que cumple con lo necesario, trabajar con corrientes superiores a los 200mA que necesita el motor. Con este transistor se pueden manejar corrientes de hasta 600/800mA según el encapsulado es un transistor BJT (bipolar) por lo que, para activar su base se necesita de una corriente (a diferencia de los transistores JFET o MOSFET que lo que se requiere es un voltaje).

En el momento de la comparación la página marcaba sin existencia el transistor, sin embargo, es más probable comprar este transistor con el encapsulado TO-93 que con la TO-18, por lo que en este caso se elige al encapsulado más común por comodidad del usuario.

Para los transistores BJT, la corriente que se necesita que fluya entre colector y emisor (correspondiente a la corriente del sistema a controlar, en este caso los 250mA del motor), va a estar relacionada con la corriente necesaria en base para su activación a través de lo que se conoce como la ganancia del transistor ( $\beta$  o hFE). Ya que la propiedad básica de los transistores es la amplificación de la señal, la ganancia toma un papel fundamental en la misma, comportándose como un parámetro de amplificación, de esta forma, la relación matemática establece que la corriente de colector será beta veces mayor a la de base:

$$I_c = \beta I_B$$

Y dado que la corriente que fluirá por el colector es la que se necesita para activar el motor, la corriente de colector será de unos 250 mA, este valor dependerá del fabricante del motor.

$$I_c = I_{motor} = 250 \text{ mA}$$

Por otro lado, consultando la hoja de datos o también conocida como DataSheet del transistor se puede observar, para la ganancia de éste, con una corriente de colector cercana a los 200mA se debe tomar el valor de 30.

Por lo que la corriente de base deberá de ser 30 veces inferior a la de colector. Es decir que la corriente de base del transistor tiene que ser 30 veces menor a la necesaria para activar el motor, en este caso, 8.3mA:

$$I_B = \frac{I_c}{\beta} = \frac{250 \text{ mA}}{30} = 8.3 \text{ mA}$$

Y ahora que se conoce la corriente que se le debe de suministrar a la base del transistor a partir del pin de Arduino para poder activar el motor, se debe limitar dicha corriente calculando el valor de la resistencia R (si no se pusiera esta resistencia, la corriente que se le pediría al pin sería la correspondiente a la resistencia interna de la unión base-emisor del transistor, la cual es muy pequeña, y demandaría por tanto una gran cantidad de corriente, superior a la que podría suministrar el pin).

Internamente, la conexión base-emisor de un transistor se puede modelar como un diodo (una unión PN, pues se trata de un transistor NPN), con una caída de tensión máxima que se corresponde con lo especificado



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

por el fabricante en la hoja de datos como  $V_{be}$  en saturación (estado activo de modo de trabajo del transistor como interruptor), y en este caso es de 0.7 V.

Por tanto, para poder activar el motor, la resistencia máxima que se puede poner en la base del transistor vendrá dada por la llamada ley de ohm (relación básica existente entre el voltaje, la corriente y la resistencia):

$$R_B = \frac{V_{pin} - V_{be}}{I_B} = \frac{5 - 0.7}{8.3 \times 10^{-3}} = 518 \Omega$$

Es decir, la resistencia máxima que se admite en la base del transistor para asegurar que se manejen los 250 mA, deberá ser igual o menor al valor teórico máximo de 457 ohmios, el cual se puede disminuir (a menor resistencia más corriente) al valor comercial de 330, para dejar un margen de seguridad, lo que asegura que la corriente de base será de 2.5mA o más.

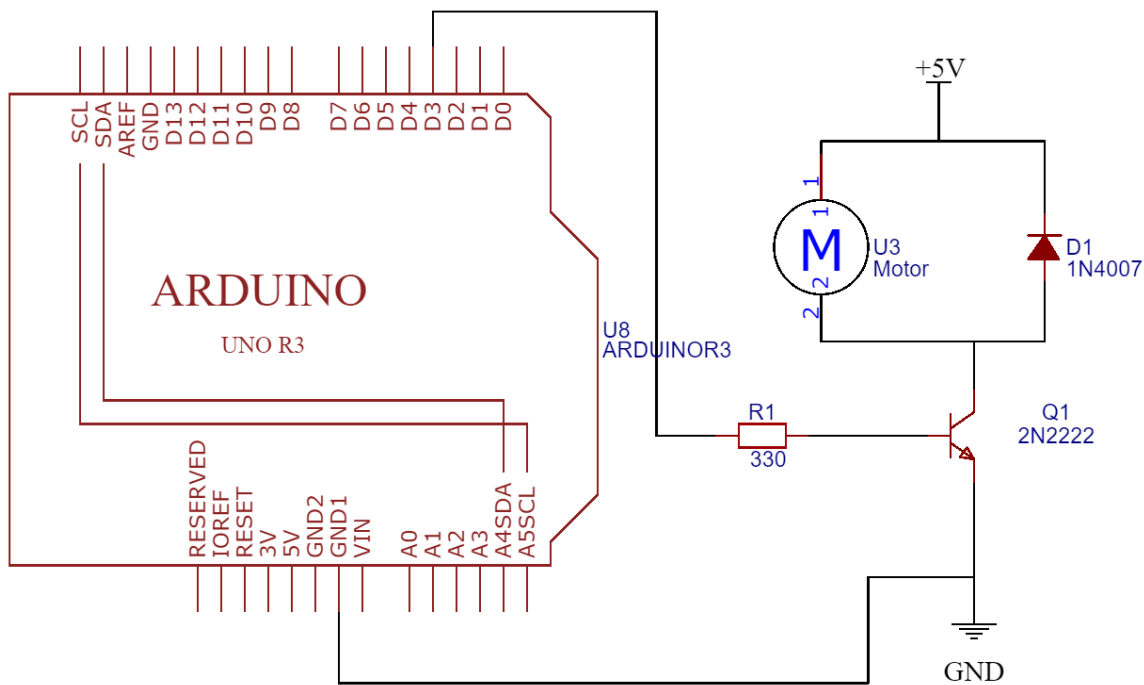


Figura 68. Conexiones de ARDUINO con circuito de potencia



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

El circuito es posible simularlo en ThinkerCAD un simulador online gratuito.

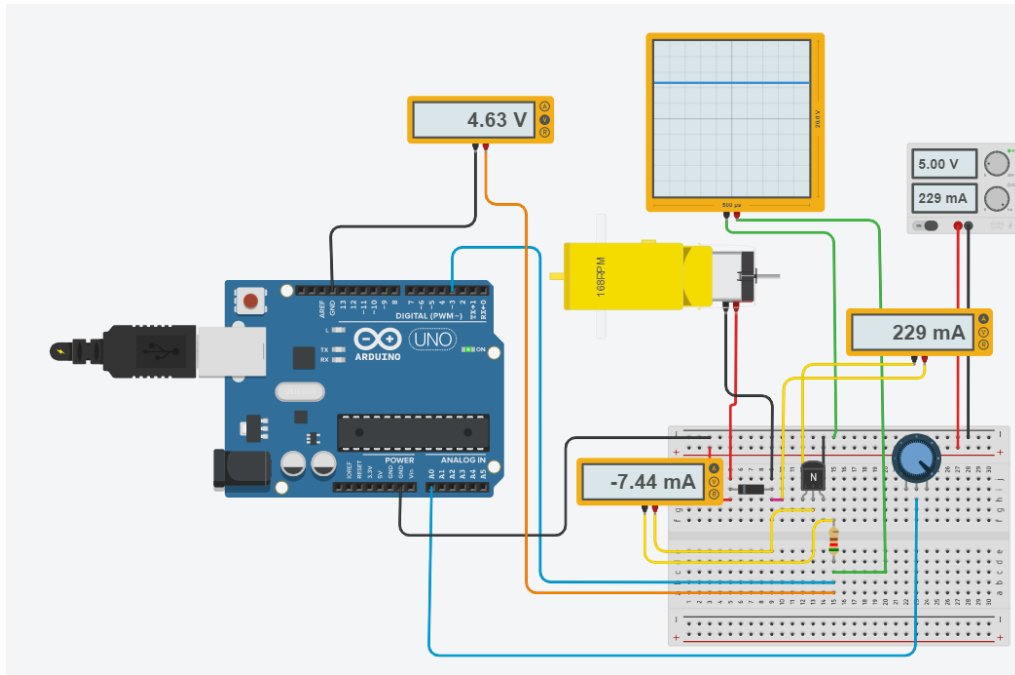


Figura 69. Simulación en ThinkerCAD corriente máxima de colector

La corriente de colector será la misma que la del motor y la corriente de base será de 7.44 mA, el cambio de corriente entre el cálculo y la simulación es la corriente que marca como necesaria el software. Por seguridad se tomará el valor de 250 mA en lugar de 228 mA.

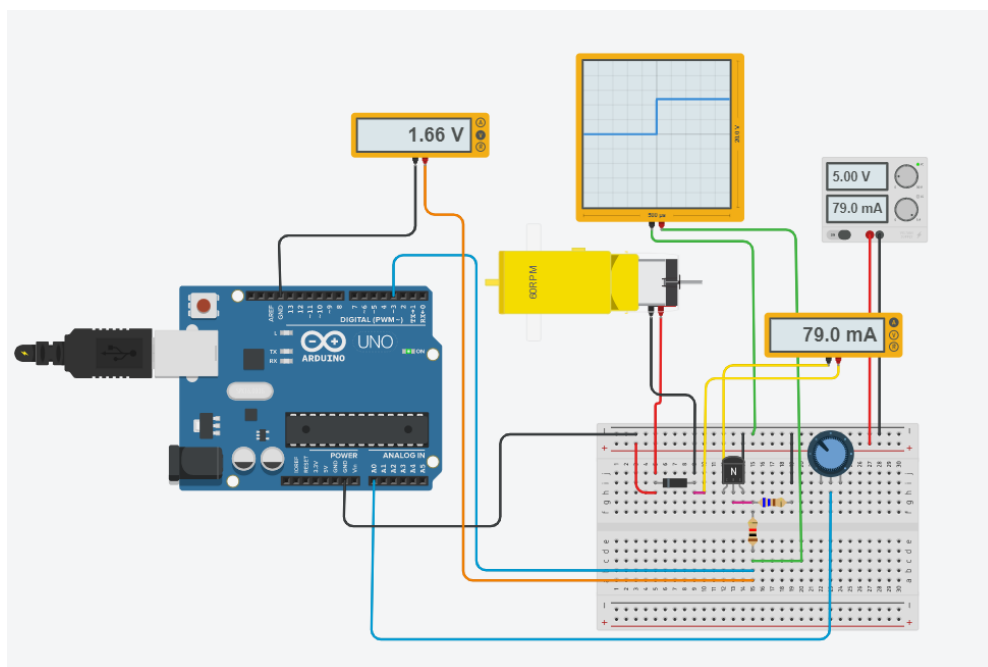


Figura 70. Simulación en ThinkerCAD del corriente al 34% de PWM



### 7.2.6.9 Diseño PCB

El diseño de la PCB tiene gran importancia al momento del ensamble si se desea un sistema donde convivan diferentes conexiones electrónicas, para lograr esto es necesario seguir algunas recomendaciones ya que un mal diseño podría interferir en el funcionamiento de los otros componentes del sistema.

Para la creación de la PCB de la etapa de potencia se toma en cuenta las siguientes recomendaciones presentadas por la página oficial de IPC [37], estas recomendaciones son de uso voluntario para prácticas de diseño, fabricación, ensamble de circuitos impresos o PCB (Printed Circuit Board). Las ventajas de usar estas normas son las presentadas en la Figura 71:

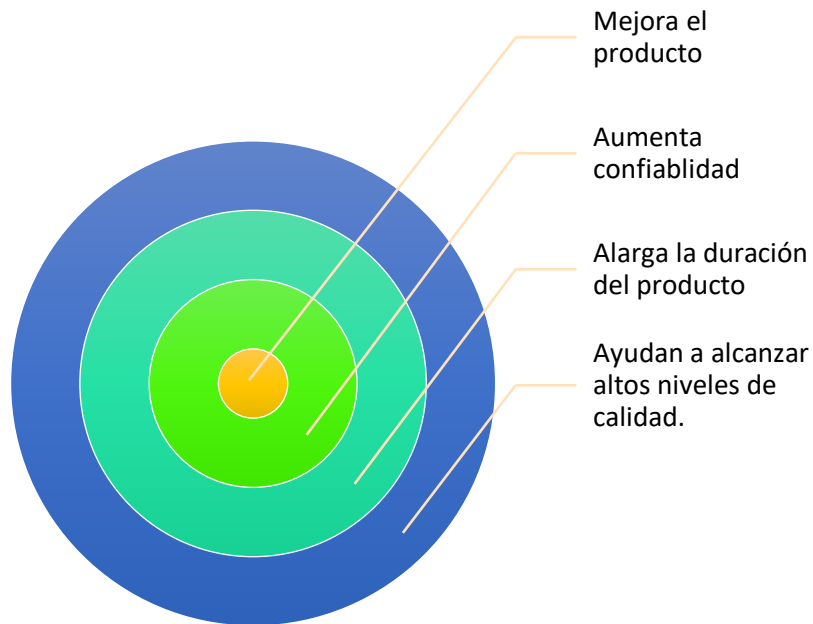


Figura 71. Ventajas de normas IPC

Se realizará la colocación de componentes, comenzando por los componentes de entrada/salida. Éstos deben colocarse de acuerdo con el diseño que se tenga en mente sobre cómo deben quedar dispuestos los mismos. Las entradas y salidas estarán lo más cercano posible a las orillas de la placa.

Se utilizarán las pistas más cortas posibles con el objetivo de minimizar los efectos parásitos resistivos y capacitivos.

Se selecciona el ancho de pista que vaya a emplearse. El ancho de la pista debe ser suficiente para permitir el paso de la corriente máxima que vaya a circular por la pista, la corriente más grande será la del motor siendo ésta de 250 mA, se puede usar un factor de seguridad de 2, por lo que la corriente que debe soportar a pista será de 0.5 mA.





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



Tabla 31. Ancho de pista según corriente

Ancho Pista	Corriente máxima
4mm	10A
2 mm	5A
1.5mm	4A
1mm	3A
0.5 mm	2A
0.2 mm	0.5 A

En este caso las pistas necesitaran 0.2 mm de ancho de pista. Igualmente, en las señales digitales no se superan corrientes máximas de 500mA, en este caso el pin digital de salida Arduino brinda una corriente máxima de 40mA.

La separación mínima entre las pistas depende de la tensión que deben soportar, en el caso de tensiones digitales entre 5 o 10 Volts se necesita una separación mínima de 0,3 mm.

No deben de existir pistas entre dos terminales de componentes activos como transistores o tiristores. Si se puede hacer entre terminales de componentes pasivos.

Se debe prever la sujeción de la placa a un chasis o caja; para ello se dispondrá un taladro de 3 mm en cada esquina de la placa.

En el trazado de las pistas es conveniente evitar el trazado de ángulos de 90, tal como se ve en la Figura 72.

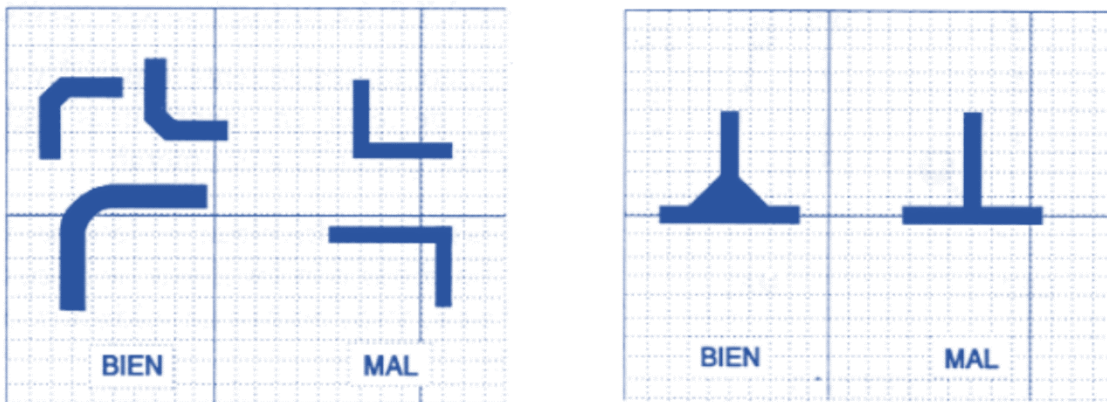


Figura 72. Reglas para trazado de pistas

Todos los componentes se colocarán paralelos a los bordes de la placa.



## TRABAJO TERMINAL INGENIERÍA MECATRÓNICA

En EasyEDA es posible simular, trazar y montar la PCB para generar los archivos necesarios para su fabricación. En este caso se diseña la PCB mostrado en la Figura 73.

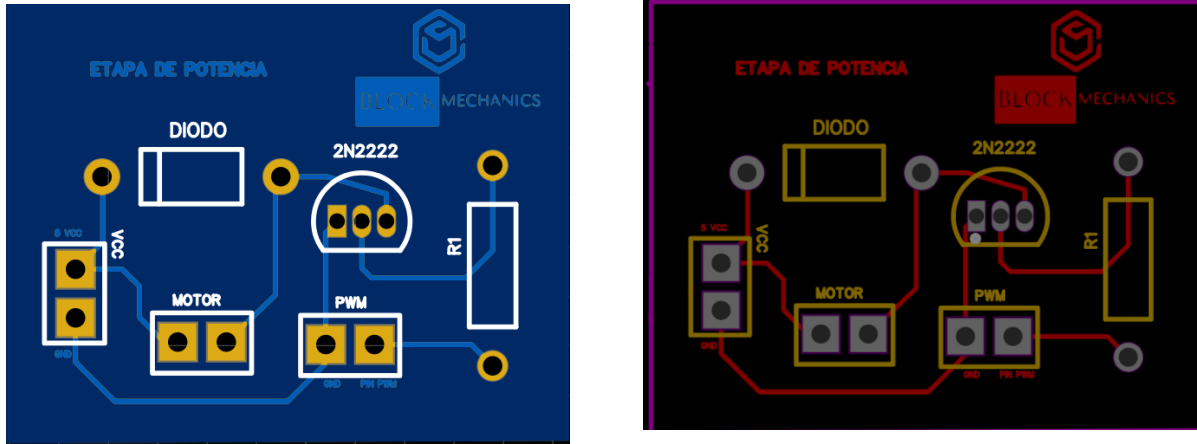


Figura 73. Trazado de pistas PCB

Obteniendo entonces la siguiente PCB:

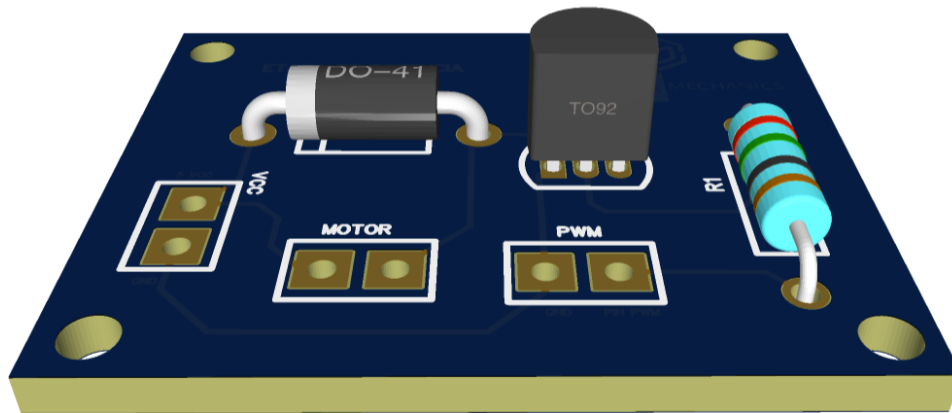


Figura 74. Simulación 3D del PCB

En los espacios para motor, alimentación y señal PWM se agregarán borneras de 2 pines, para asegurar que al conectar no se desconecten los cables o jumpers. En caso de querer que las placas se fabriquen con este acabado el software permite pedir 5 placas por 2 dólares.

TRABAJO TERMINAL  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

7.2.6.10 Selección de sensor de distancia

Para elegir el sensor se realizará un árbol de toma de decisiones el cual se presenta en la Figura 75, este árbol contiene información que ayudará a elegir de manera rápida el tipo de sensor más adecuado a la aplicación del proyecto, en este caso es el sensor ultrasónico, ya que permite detectar diferentes colores, además de que tiene un rango más amplio de detección que los otros tipos de sensores y el costo no es tan elevado.

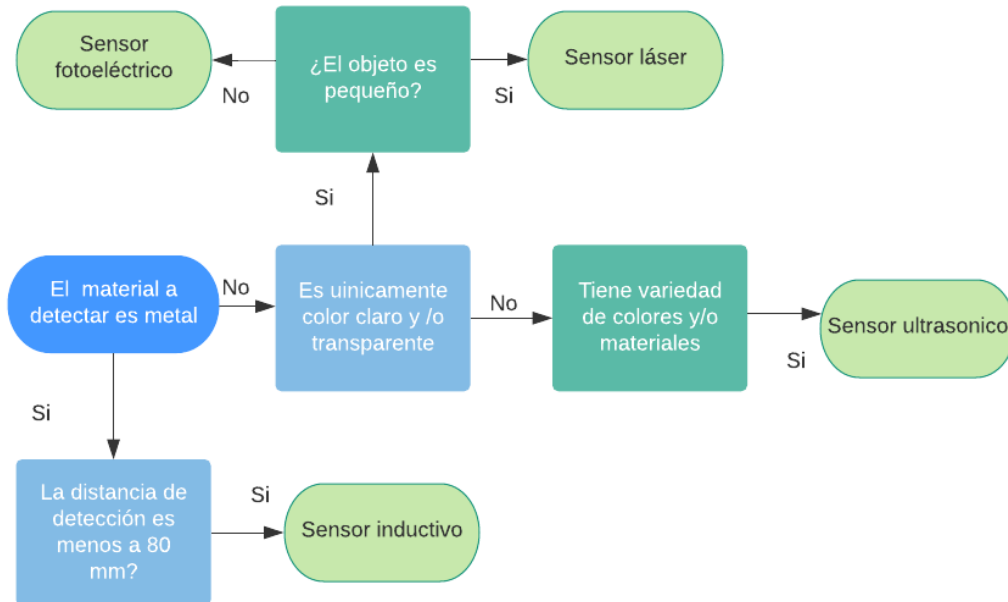



Figura 75. Árbol de decisiones para selección de sensor

Para seleccionar el sensor ultrasónico más adecuado se debe utilizar una herramienta de selección, algunos de los proveedores de dispositivos electrónicos cuentan con estas herramientas en su página web; en este caso se hará uso de Digikey [38].

### Receptores ultrasónicos, Transmisores



Los sensores ultrasónicos brindan mediciones de distancias precisas sin contacto físico.

Figura 76. Herramienta de selección de sensores ultrasónicos Digikey



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Los resultados obtenidos con esta herramienta son 3 sensores ultrasónicos, en este caso las características se presentan en la Tabla 32. Siendo el primer sensor la solución A, el segundo B y el tercero C.

*Tabla 32. Características de los sensores*

N.º de pieza de DK	Fabricante	Proveedor	Descripción	Voltaje nominal	Precio	Distancia de detección
1738-SEN0283-ND	DFRobot	DFRobot	ULTRASONIC SENS 42KHZ TRASHSONAR	3V ~ 5.5V	\$ 110.00	0cm to 350cm
1528-2832-ND	Adafruit Industries LLC	Adafruit Industries LLC	ULTRASONIC SENSOR DISTANCE 3V	3V ~ 5.5V	\$ 3.95	2cm - 450cm
1738-SEN0282-ND	DFRobot	DFRobot	ULTRASONIC SENSOR 42KHZ MAXSONAR	3V ~ 5.5V	\$ 114.95	0-cm to 765cm

Con estos datos es posible evaluar los 3 sensores mediante la matriz multicriterio AHP. Los criterios que en este momento pueden marcar la diferencia entre seleccionar un criterio u otro son: Disponibilidad, precio, tamaño y precisión. Se crea la matriz de ponderación de criterios en donde se compara criterio por criterio y se compara el nivel de importancia.

*Tabla 33. Matriz multicriterio AHP de criterios de selección de sensores*

Cr	1	4	3	4
Cr1	1	4	5	2
Cr2	1/4	1	3	4
Cr3	1/5	1/3	1	5
Cr4	1/2	1/4	1/5	1
$\Sigma y$	1.95	5.58	9.20	12.00

Con esta matriz se crea la matriz normalizada obteniendo la suma de cada una de las filas, esta matriz es presentada en la Tabla 34:

*Tabla 34. Matriz normalizada de selección de sensor*

Cr	1	2	3	4	$\Sigma x$	CRITERIOS
1	0.513	0.716	0.543	0.167	1.939	Disponibilidad
2	0.128	0.179	0.326	0.333	0.967	Precio
3	0.103	0.060	0.109	0.417	0.688	Distancia de detección
4	0.25641026	0.045	0.022	0.083	0.406	Tamaño
$\Sigma y$	1.00	1.00	1.00	1.00		

La suma de cada fila presentada en niveles de colores se divide entre el total de criterios establecidos para obtener el vector de prioridad de criterios  $V\hat{C}_r$  presentado en la Tabla 35.

*Tabla 35. Vector de prioridad de criterios para selección del sensor*

$V\hat{C}_r =$	0.48484584
	0.24168247
	0.17190698
	0.10156471



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Los resultados de la comparación se encuentran en las siguientes matrices mostradas en la Tabla 36, en estas se comparan solución por solución por los cuatro criterios definidos.

*Tabla 36. Matrices de selección de sensor*

<b>SENSOR ULTRASÓNICO</b>												
Matrices de criterios para las combinaciones seleccionadas								Vector de prioridad				
MCr1	A	B	C		MCr1	A	B	C	$\Sigma x$	VCr1=	0.211361738	
A	1	1/5	3		A	0.158	0.143	0.333	0.63408521		0.686438318	
B	5	1	5		B	0.789	0.714	0.556	2.05931495		0.102199944	
C	1/3	0.2	1		C	0.053	0.143	0.111	0.30659983		$\Sigma y$	1
$\Sigma y$	6 1/3	1.4	9		$\Sigma y$	1	1	1				
MCr2	A	B	C		MCr2	A	B	C	$\Sigma x$	VCr2=	0.11492674	
A	1	1/5	1/2		A	0.125	0.143	0.077	0.34478022		0.702838828	
B	5	1	5		B	0.625	0.714	0.769	2.10851648		0.182234432	
C	2	0.2	1		C	0.250	0.143	0.154	0.5467033		$\Sigma y$	1
$\Sigma y$	8	1.4	6.5		$\Sigma y$	1	1	1				
MCr3	A	B	C		MCr3	A	B	C	$\Sigma x$	VCr3=	0.268013468	
A	1	2	1/3		A	0.22222222	0.4	0.18181818	0.8040404		0.194612795	
B	0.5	1	1/2		B	0.11111111	0.2	0.27272727	0.58383838		0.537373737	
C	3	2	1		C	0.66666667	0.4	0.54545455	1.61212121		$\Sigma y$	1
$\Sigma y$	4.5	5	1.83333333		$\Sigma y$	1	1	1				
MCr4	A	B	C		MCr3	A	B	C	$\Sigma x$	VCr4=	0.4	
A	1	2	1		A	0.4	0.4	0.4	1.2		0.2	
B	0.5	1	1/2		B	0.2	0.2	0.2	0.6		0.4	
C	1	2	1		C	0.4	0.4	0.4	1.2		$\Sigma y$	1
$\Sigma y$	2.5	5	2.5		$\Sigma y$	1	1	1				

VCr de la Tabla 36 será el resultado de las soluciones propuestas (primera fila solución A, segunda B y tercera C), VCr será el resultado de la evaluación del primer criterio, VCr2 será el resultado de las soluciones evaluando el segundo criterio y así sucesivamente.

Para obtener la solución final se multiplica cada fila del vector de prioridad de criterios de Tabla 37 por cada fila de los VCr de la Tabla 36.

Con este procedimiento se obtiene que la solución ganadora es la solución B, con un valor de ponderación de 0.5564 presentado en la Tabla 37. Vector de ponderación total de selección del sensor.

*Tabla 37. Vector de ponderación total de selección del sensor*

Vector de ponderación total	
Atot=	0.216953
Btot=	0.556449
Ctot=	0.226598
$\Sigma y$	1.000000

## TRABAJO TERMINAL INGENIERÍA MECATRÓNICA

### 7.2.6.11 Conexión de componentes

Para poder hacer las mediciones de parámetros definidos en los módulos y funciones del sistema es necesario hacer conexiones entre el sensor y la placa Arduino. De acuerdo con el modelo de sensor infrarrojo VL510X, las conexiones necesarias son las mostradas en la Figura 77. Conexión de sensor y placa .

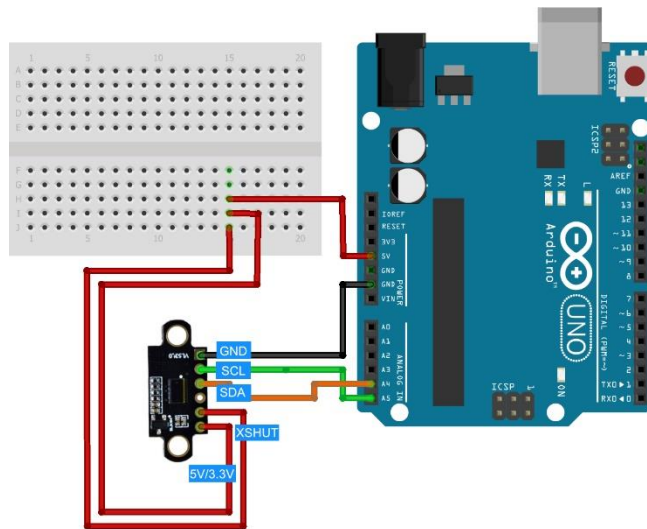


Figura 77. Conexión de sensor y placa Arduino

En este caso se muestra de manera ilustrativa en una placa Protoboard sin embargo para el ensamblaje en el mecanismo puede realizarse de manera directa mediante cableado, procurando usar jumpers o cables alrededor de los 20 cm.

Al realizar las conexiones de acondicionamiento de energía para el motor y el sensor para la medición de parámetros las conexiones serían las mostradas en la Figura 78. Conexiones finales.

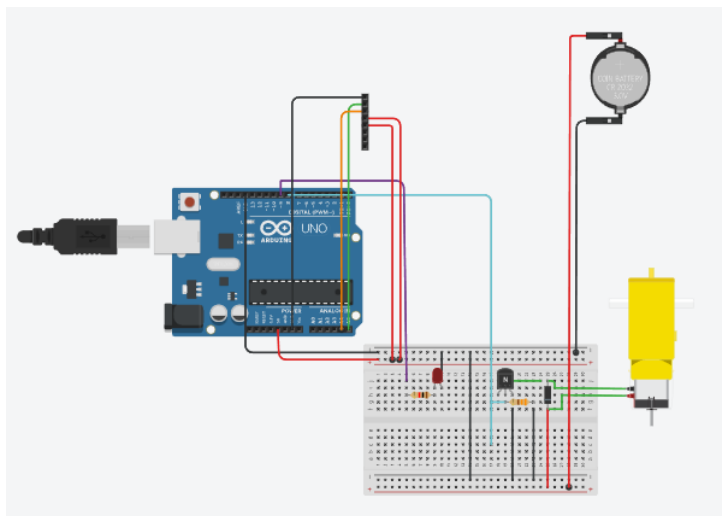


Figura 78. Conexiones finales



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



La lista de componentes necesarios para estas conexiones se encuentra a continuación en la Tabla 38. Lista de componentes electrónicos.

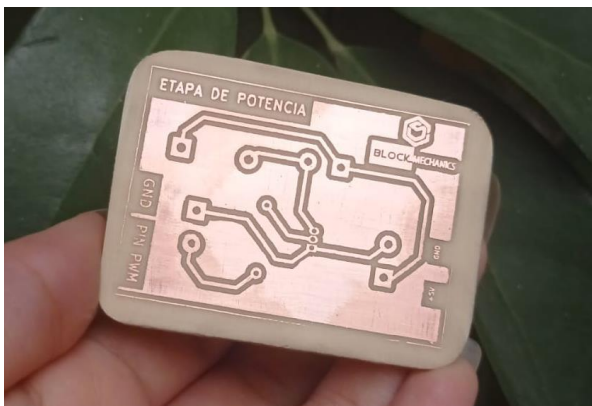
Tabla 38. Lista de componentes electrónicos

Cantidad	Componente
1	Arduino Uno R3
1	Motor de aficionado
1	Transistor NPN (BJT)
1	LED
1	Sensor Infrarrojo de distancia VL510x
1	Diodo
1	330 $\Omega$ Resistencia
1	Fuente de tensión de 5V

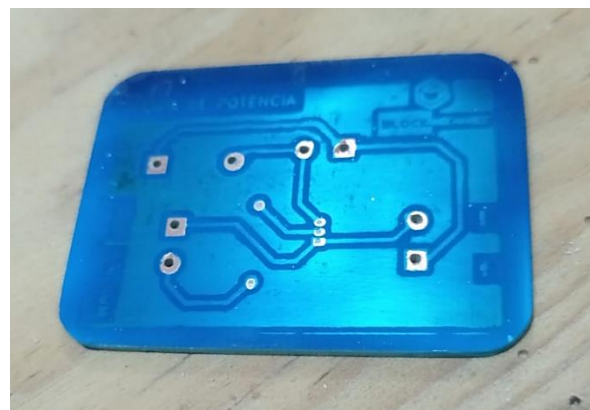
La versión de la placa Arduino puede ser diferente, en el caso de este proyecto se usará la placa Arduino Mega para pruebas.

El transistor será el seleccionado en la sección 7.2.6.8 Acondicionamiento de energía del motor, el cual es un Transistor BJT 2N2222.

En caso de hacer las conexiones electronicas en el salón de clase puede usarse una Protoboard para la conexión del transistor, sin embargo, también puede realizarse la tarjeta PBC desarrollada en la sección 7.2.6.9 Diseño PCB. Para que el usuario pueda imprimirla y realizarla mediante la técnica de planchado se asignó una página con el diseño en la sección ANEXO NO. 4 Diseño PCB. En la Figura 79 puede observarse la placa propuesta realizada para este proyecto.



a)



b)

Figura 79. Placa PCB propuesta por técnica de planchado a) Sin tinta protectora b) Con tinta protectora





#### 7.2.6.12 *Diseño de la interfaz para Arduino*

Para la comunicación con el usuario se desea que la interacción con la computadora sea fácil y eficiente. Las técnicas de diálogo más comunes incluyen menús, comandos y entrada de datos, sin embargo, para poder elegir las más adecuadas se debe tomar en cuenta el concepto de ergonomía.

La ergonomía la define Wisner, apud Fialho & Santos [42] como: "El conjunto de conocimiento científico relacionado con el hombre y necesarios para el diseño de instrumentos, máquinas y dispositivos que se pueden utilizar con el máximo de comodidad, seguridad y eficiencia".

En el caso de los softwares, necesitan cumplir ciertas características para que pueda considerarse ergonómico. Para el profesor Hans Marmolin, UI Design, A. B [43], un producto software que quiera ser catalogado como ergonómico, deberá seguir los siguientes siete principios que rigen el diseño de los diálogos ergonómicos:

- 1) Adecuado para el trabajo al que se destina.
- 2) Autodescriptivo.
- 3) Controlable.
- 4) Conforme a las expectativas que genera.
- 5) Tolerante con los errores que el usuario pueda cometer.
- 6) Personalizable por el usuario.
- 7) Documentado suficientemente para facilitar su aprendizaje.

*Figura 80. Principios de diálogos ergonómicos*

A continuación, se presentan las definiciones de cada punto:

La adecuación del software para el trabajo que se destina tiene el objetivo de facilitar la interacción hombre-máquina. Esto se consigue mediante una definición clara de lo que realizan las diferentes opciones del software. También es importante que se oculten al usuario la complejidad de los procesos internos que los programas y el ordenador están realizando, es por esta razón que se deben elegir las opciones que no aumenten la complejidad del uso del software con los circuitos de potencia y su programación.





**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Para que una aplicación sea autodescritiva, deberá ser fácil y que permita al usuario comprenderla rápidamente. Esto quiere decir que el usuario no tendrá que verificar en el manual qué es lo que se puede esperar de un menú o qué significado tienen los diferentes términos y palabras que aparezcan en él.

Cuando se dice que el software ergonómico debe ser controlable, quiere decir que aquella persona que lo esté usando tendrá en todo momento la posibilidad de cancelar acciones que haya emprendido, deshacer los últimos comandos que haya ordenado y gobernar sus dispositivos de entrada y salida de datos, por esta razón se tiene definido un control de stop para que el usuario decida parar la simulación.

Con el fin de que un sistema sea o amigable, es importante que no permita a los usuarios el ejecutar tareas que puedan provocar un error irreparable. Los sistemas ergonómicos deben tratar de prevenir al usuario de lo que puede suceder además de detectar y avisar al usuario de los errores.

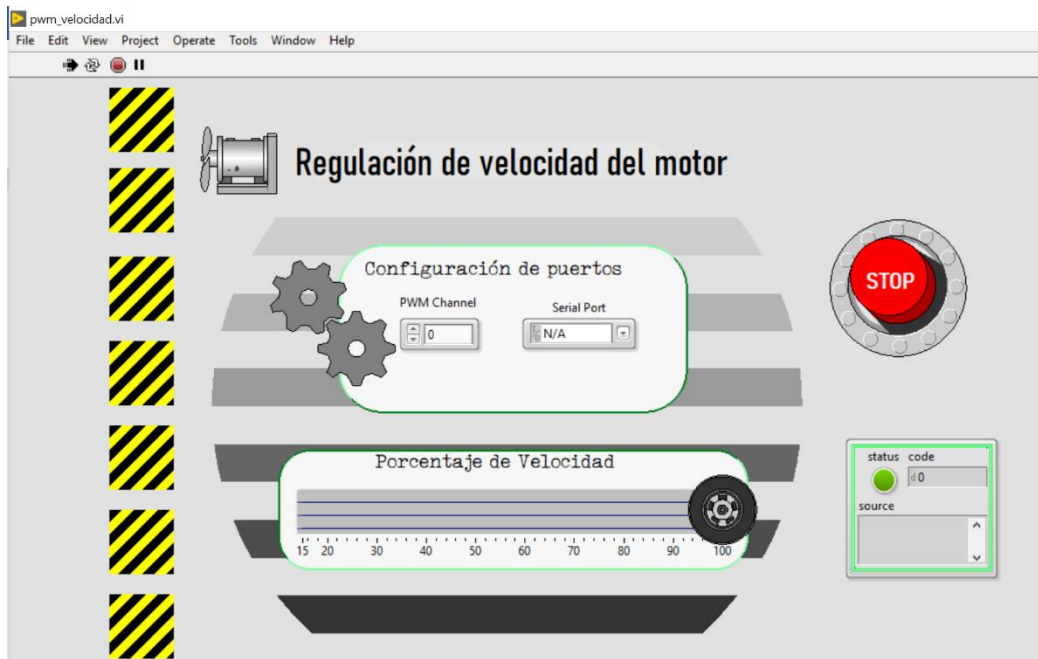


Figura 81. Panel frontal.



### 7.2.6.13 Propuesta de estructura del programa final

Existen diferentes modelos de procesos para la Ingeniería de Software y cada uno de estos modelos pretende proporcionar orden al proceso de desarrollar software. Para el caso de este proyecto, se debe apegar lo más posible a uno de estos modelos con el fin de tener una organización de actividades basadas en etapas interconectadas entre sí. El modelo de ingeniería de software que se usará es el siguiente.



Figura 82. Modelo de ingeniería de software lineal secuencial

EL VI de LabVIEW debe tener características tales que se cumpla con los objetivos del proyecto, es decir que el software este orientado a sus usuarios para que realmente pueda ser aplicado al área y nivel del conocimiento definidos, para lograr esto se hace un análisis de los requisitos del software. El proceso de reunión de requisitos en este caso se centra especialmente en el software. Según Pressman, dentro del proceso de análisis es fundamental que, a través de una colección de requerimientos funcionales y no funcionales, el desarrollador o desarrolladores del software comprendan completamente la naturaleza de los programas que deben construirse para desarrollar la aplicación, la función requerida, comportamiento, rendimiento e interconexión. Para este punto se utilizan parte de las necesidades y requerimientos definidos en la Tabla 3 y Tabla 4.

Pressman [44] menciona que el diseño del software es un proceso de muchos pasos pero que se clasifican dentro de uno mismo. En general, la actividad del diseño se refiere al establecimiento de las estructuras de datos, la arquitectura general del software, representaciones de interfaz y algoritmos.

Shaw y Garlan [45] describen aspectos que deben especificarse como partes de un buen diseño arquitectónico. Estos tres aspectos son:

- Propiedades estructurales
- Propiedades extra-funcionales
- Familias de Sistemas Relacionados.

Este es el aspecto de la representación de software que define los componentes de un sistema, y la manera en que se empaquetan estos componentes e interactúan unos con los otros. Este proyecto propone ambientes virtuales integrados para formar una aplicación conjunta que puede presentarse a los usuarios.



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

La especificación de la arquitectura de este software puede verse con el concepto de modularidad del software, ya que tiene componentes individuales que al unirse entre sí formarán ambiente virtual. La interfaz principal se va a componer de 5 bloques importantes los cuales son:

- Toolbox
- Animación del mecanismo
- Introducción de datos de entrada
- Datos de salida numérico
- Datos de salida grafico

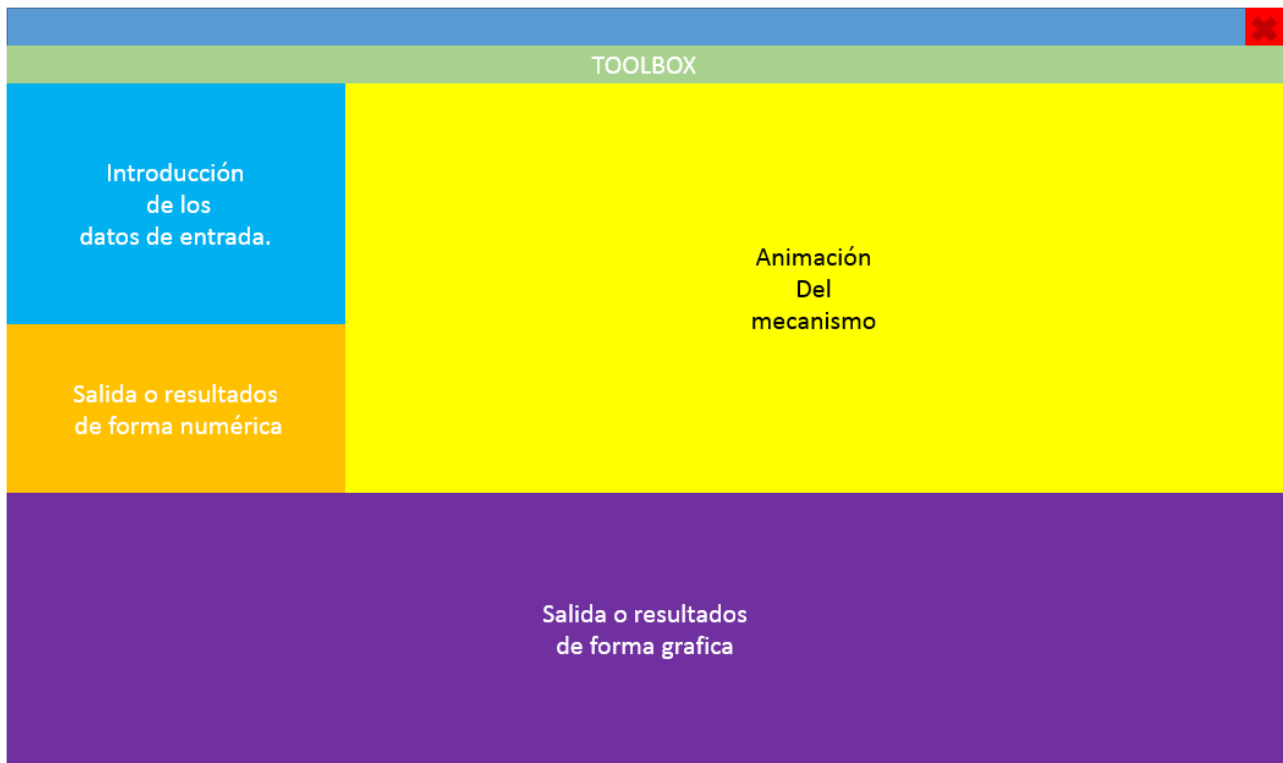


Figura 83. Propuesta de interfaz de usuario

### Toolbox

En este bloque se tiene planeado que se encuentren algunas funciones de la herramienta virtual como es la selección del tipo de mecanismo, hacer la conexión con la tarjeta, la verificación de la correcta conexión de la tarjeta con el sistema físico.



## TRABAJO TERMINAL INGENIERÍA MECATRÓNICA

### Animación del mecanismo

En este bloque se va a visualizar el movimiento que va a tener el mecanismo conforme a los datos de entrada que brinde el usuario.

### Introducción de los datos de entrada

El usuario podrá ingresar en este bloque los datos de entrada necesarios para poder dar funcionamiento al mecanismo y poder obtener los resultados gráficos y numéricos.

### Resultados de forma numérica

En este bloque es donde saldrán los resultados de forma numérica después de que el sistema haya realizado el cálculo de la cinemática.

### Resultados de forma gráfica

En este bloque es donde saldrán los resultados de forma gráfica después de que el sistema haya realizado el cálculo de la cinemática.

Las propiedades extra funcionales se refieren a como el software cumple con características de sensibilidad a la presencia del usuario, capacidad, fiabilidad, seguridad, adaptabilidad, y otras características. Como sensibilidad a presencia del usuario. El VI de LabVIEW que se desarrolle deberá permitir captar acciones producidas por los usuarios para generar respuestas. Con esto las escenas virtuales se vuelven interactivas.

En la Figura 84 se crea un diagrama entidad relación para representar la arquitectura del sistema.

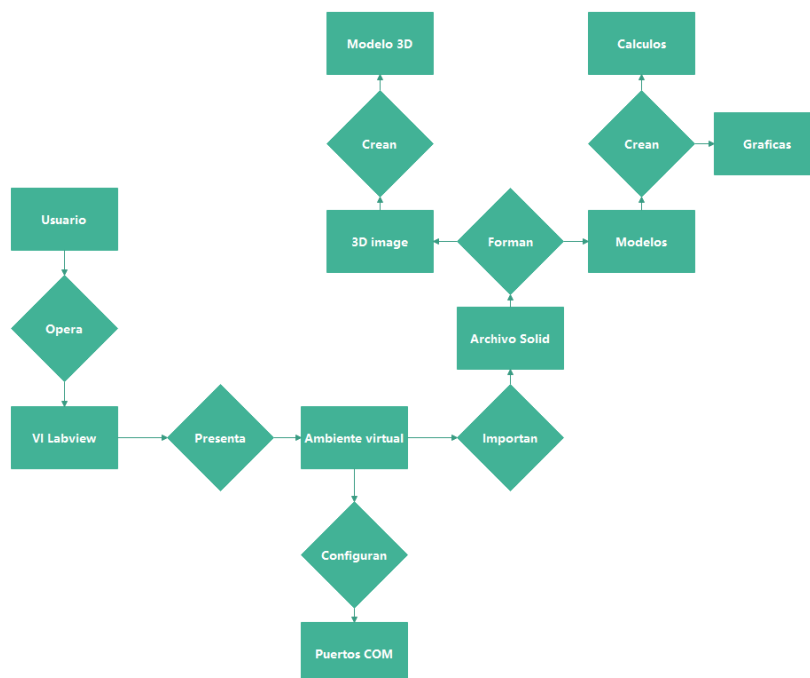


Figura 84. Diagrama entidad relación para la arquitectura del sistema

TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

### 7.2.7 Manufactura e implementación

#### 7.2.7.1 Desarrollo de mecanismos en 3D

El diseño de los mecanismos fue desarrollado en el Software Solidworks mostrando un panorama de modularidad para la construcción de nueve mecanismos virtuales los cuales son: biela-manivela-corredera entrado y descentrado, el mecanismo de colisa, yugo escoses, el mecanismo de Whitworth, balancín-balancín, el mecanismo de manivela-balancín y la manivela-manivela.

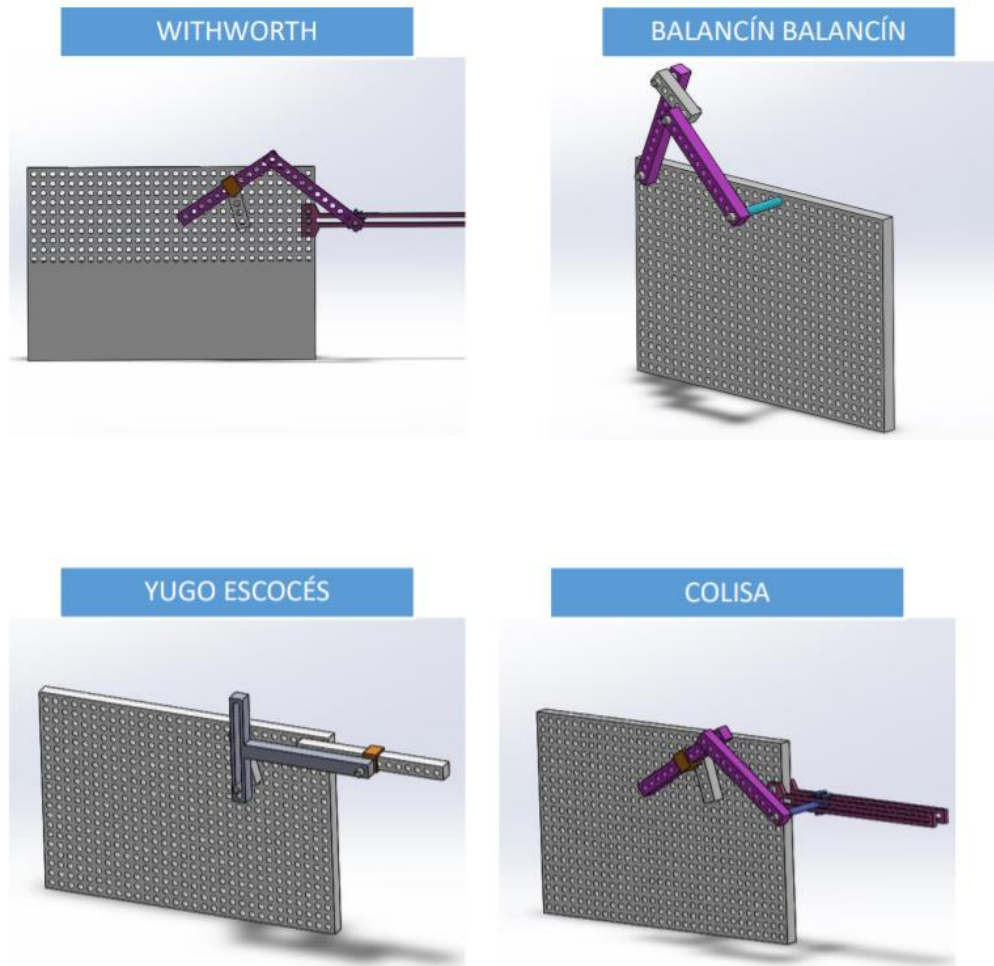


Figura 85. Mecanismos desarrollados en SolidWorks parte 1



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
TRABAJO TERMINAL  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



En el diseño se implementaron exitosamente 18 piezas modulares que interactúan entre sí para la creación de nueve mecanismos distintos, se puede observar en las imágenes de los mecanismos que las piezas utilizadas son similares entre sí ya que cada diseño fue pensado para reutilizar la mayoría de las piezas, reduciendo la impresión de nuevas piezas o adecuando algunas con la menor modificación posible.

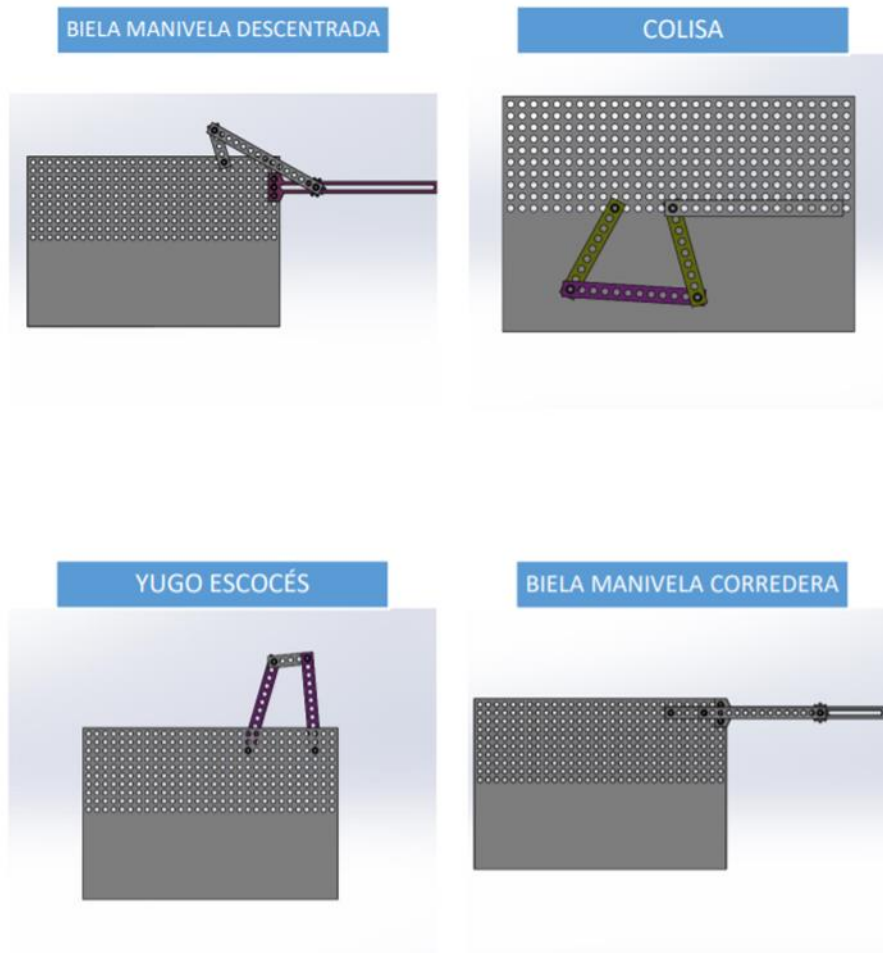


Figura 86. Mecanismos desarrollados en SolidWorks parte 2



TRABAJO TERMINAL  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

*7.2.7.2 Manufactura en impresión 3D del mecanismo físico*

Una vez que se tuvieron listos los diseños de los mecanismos en Solidworks se mandaron imprimir a una impresora 3D por el método de modelado por deposición fundida, anteriormente descrito en el apartado de selección de método de manufactura, para poder llevar a cabo la impresión 3D se solicitaron los archivos con la extensión STL ya que se utilizó Cura, una aplicación diseñada para impresoras 3D, en la que se pueden modificar los parámetros de impresión y después transformarlos a código G. Fue creada por David Braan, que después de un tiempo trabajaría para Ultimaker, una empresa dedicada al diseño y fabricación de impresoras 3D. El software es utilizado por más de un millón de usuarios en todo el mundo y es del software de impresión 3D más usado en las impresoras 3D.

En Cura se modificó el ancho de línea de impresión, la velocidad a la que se imprimieron las piezas, los soportes de las piezas, etc. Una vez que se realizaron estas configuraciones en el software, éste mismo transformó las piezas en mallas dándole el formato gcode, después de realizar este paso se guardan los archivos en una USB para ser colocados en la impresora, al colocar la USB en la impresora se mandan llamar los archivos uno a uno para ser comenzar la impresión.

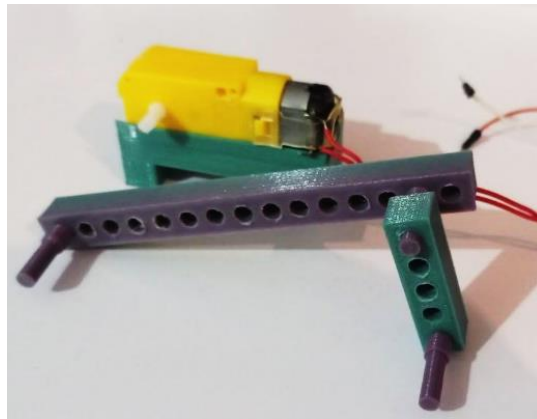


Figura 87. Impresión de las piezas

En la Figura 88. Ensamble del mecanismo físico. se recrean las piezas impresas y se indica como es que se deben ensamblar para implementar el mecanismo.





TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

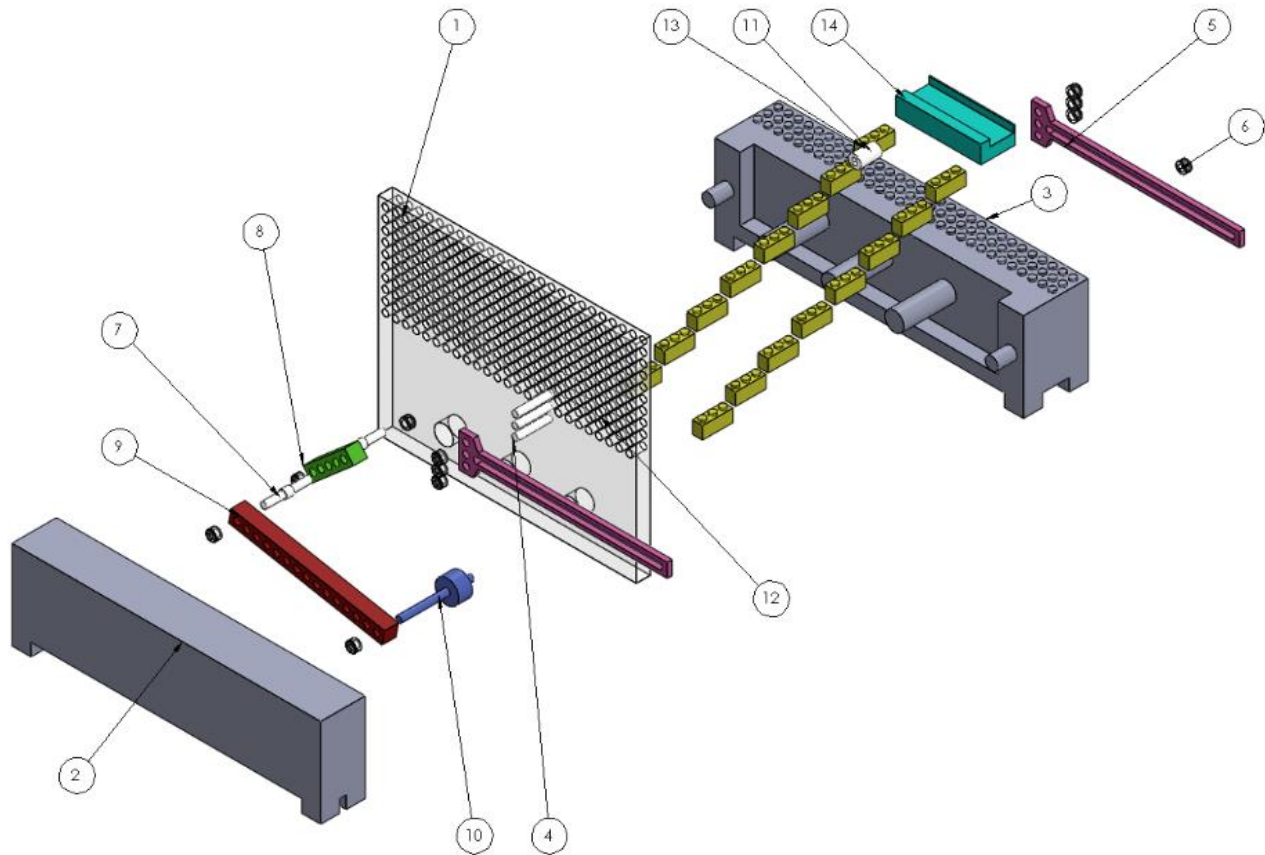


Figura 88. Ensamble del mecanismo físico.

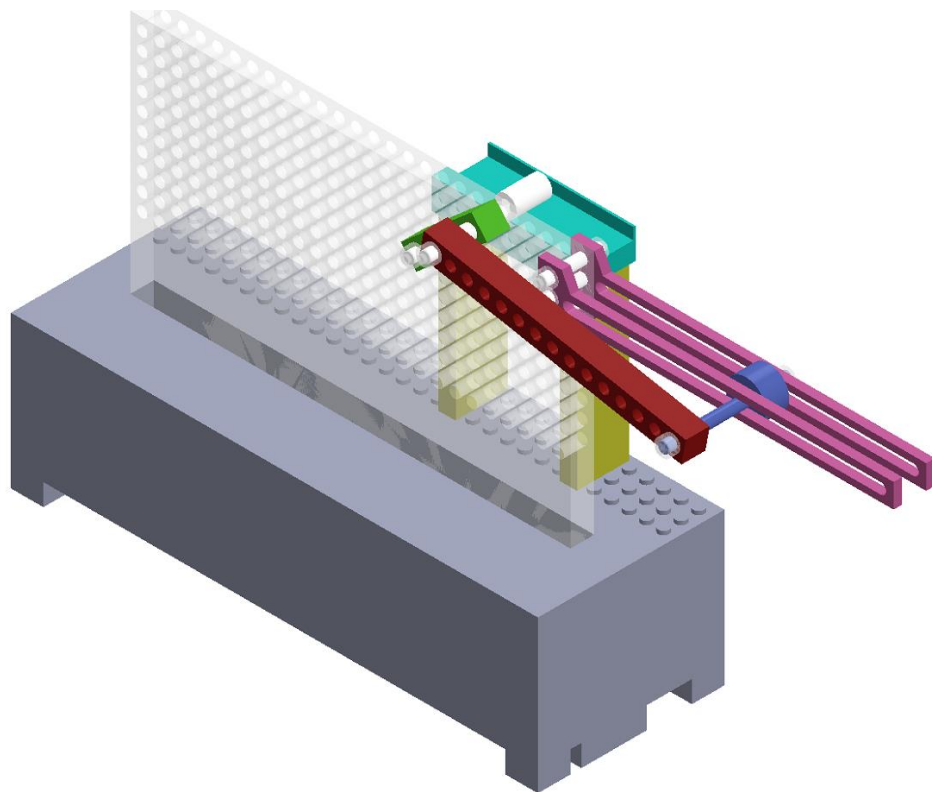
1. Se ensamblan las piezas 1, 2 y 3 posicionando 1 en 3 y embonando con la pieza 2, quedando lista la base para montar el mecanismo.
2. Seguidamente se colocan las piezas 4 a una altura considerable para que coincidan con el motor, seguidamente se insertan las piezas 5 y se sujetan con las piezas 6.
3. Al ensamblar la pieza 11 en una de las piezas 7 se colocan en la pieza 1 y se sujetan con una de las piezas 6.
4. Al anterior ensamble se adiciona una de las piezas 6 junto con la pieza 9 asegurándolas con una de las piezas 6.



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

5. Posteriormente se coloca la pieza número 10 entre las piezas 5 sujetándola de la pieza 9 y asegurándola con una de las piezas 6.
6. Finalmente se ensambla el soporte del motor utilizando las piezas 12 necesarias para dar la altura deseada al mecanismo, al terminar el ensamble de las piezas 12 se coloca encima la pieza 14 para sostener el motor.

Si el mecanismo quedo correctamente ensamblado deberá visualizarse como en la Figura 92.



*Figura 89. Visualización del mecanismo físico.*

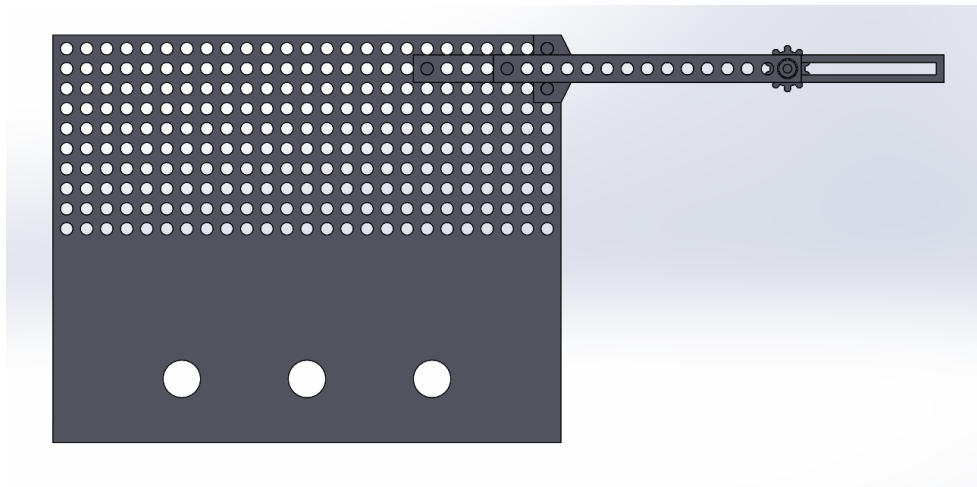


### 7.2.7.3 Modelado virtual de los mecanismos mediante modelos matemáticos

El diseño de los mecanismos se realizó por medio SolidWorks permitiendo dimensionarlos acorde a las necesidades didácticas del proyecto, dándoles acabados realistas para que aparentaran ser piezas modulares de plástico. Un ejemplo de los mecanismos desarrollados es el mostrado en la Figura 90. Mecanismo biela manivela corredera en SolidWorks.

En primera instancia los mecanismos fueron creados acorde a los bocetos presentados en Trabajo Terminal, esto cambió con la importación de las piezas que conforman los mecanismos en SolidWorks, ya que Matlab no permite implementar ciertas restricciones existentes en SolidWorks, por lo que fue necesario retirar los pernos de los mecanismos, así como realizar la unión de algunas piezas para facilitar la relación de posición en Matlab.

Para trasladar de SolidWorks a Matlab los modelos de los mecanismos fue necesario asignar una posición inicial con el propósito de facilitar la coincidencia del valor inicial de los ángulos y distancias en el cálculo analítico de cada mecanismo, como se observa en la figura para el mecanismo biela-manivela-corredera. En la pestaña guardar como de SolidWorks se selecciona la extensión WRL ya que es el formato compatible con Matlab-Simulink.



*Figura 90. Mecanismo biela manivela corredera en SolidWorks*

Dar una posición inicial al mecanismo fue de gran ayuda ya que así se facilitó su manipulación y compatibilidad con el modelo matemático (Matlab-Funtion), posteriormente se creó un nuevo diagrama en Simulink, donde se introdujo el bloque VRsink de Simulink, dicho bloque es un entorno que tiene como propósito el simular el movimiento de mecanismos o cualquier modelo que requiera la interpretación de movimiento en tres dimensiones.

El objetivo del entorno VRsink fue transformar el archivo wrl extraído de SolidWorks al bloque. Primeramente, fue necesario visualizar los orígenes de cada pieza para crear relaciones de posición Padre-hijo respecto de la pieza base de la corredera como se muestra en la Figura 91.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



Las relaciones de posición que se indicaron fueron respecto de la base para hacer el eslabón 1 hijo de esta misma, así mismo el eslabón 2 es hijo del eslabón 1 y la corredera fue hija del eslabón 2 para crear una sinergia de movimiento entre las piezas que componen al mecanismo biela-manivela-corredera.

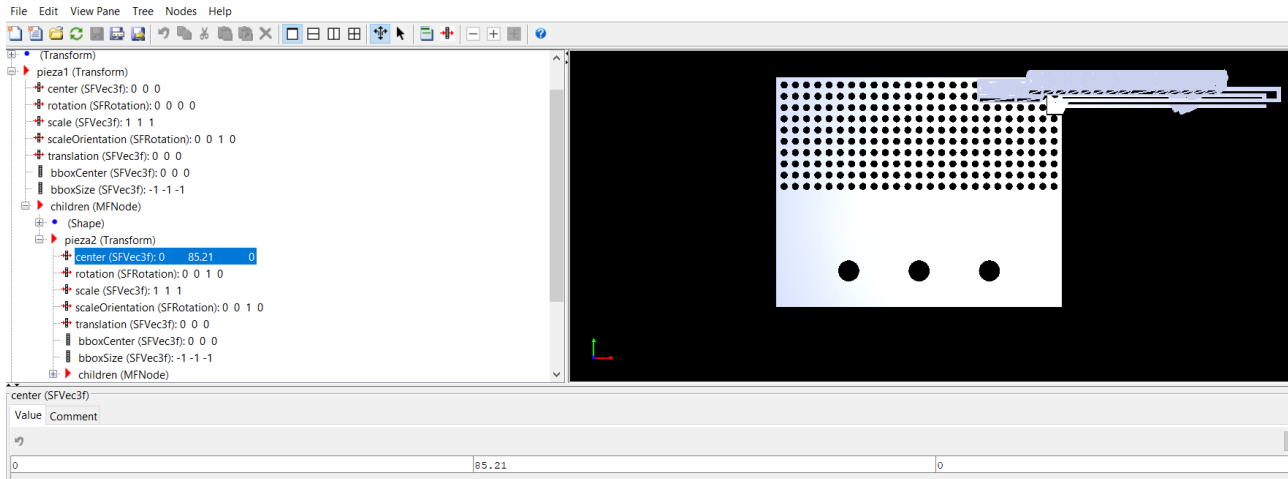


Figura 91. Configuración del archivo.wrl en VRSink

Por consiguiente, al cargar y acondicionar el modelo del mecanismo en Matlab fue necesario crear una Matlab-Function con las ecuaciones de movimiento que describen al mecanismo biela-manivela-corredera. En los anexos se pueden observar los algoritmos de las ecuaciones para cada uno de los mecanismos planteados, en la Figura 92 se muestra la configuración de la Matlab-Function, cuya función es obtener la variación de los ángulos para poder lograr el correcto funcionamiento de la simulación del mecanismo.

```
ATLAB Function x MATLAB Function x +
function [th2p, xep] = fcn(th2, th1p, th1)

l1=0.032%
l2=0.112

% Posición
% xe=l1*cos(th1)+l2*cos(th2);
% l2*sin(th2)=l1*sin(th1)-y;
% th2p=asin((-l1*sin(th1))/l2)%
% xep=l1*cos(th1)+l2*cos(th2)%

% velocidad
th2p=(-l1*cos(th1)*th1p)/(l2*cos(th2));
xep=-l1*sin(th1)*th1p-l2*sin(th2)*th2p;
```

Figura 92. Matlab Function con ecuaciones

Para crear una relación entre las ecuaciones y el modelo del mecanismo se alimentaron las entradas de la Matlab-Function con la constante de velocidad para los ángulos, con un paso de integración dirigido al ángulo



## TRABAJO TERMINAL INGENIERÍA MECATRÓNICA

original. En el bloque VRsink se indicó que se quería dar rotación al primer y segundo eslabón como se muestra en la Figura 93.

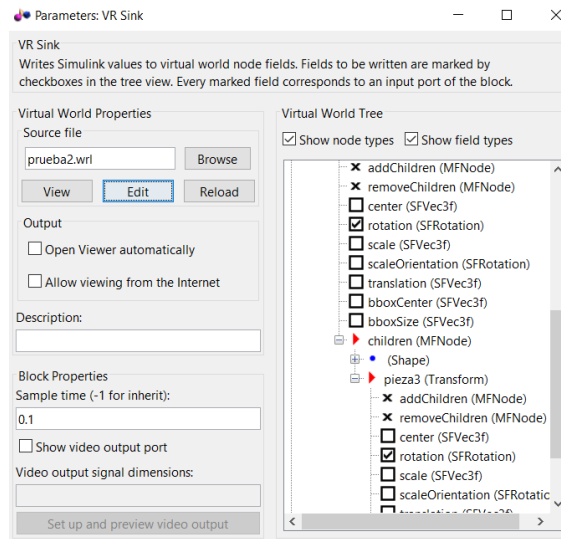


Figura 93. Configuración de rotaciones y traslaciones

Ya que el VRsink trabaja con coordenadas cartesianas se introdujeron las constantes indicando que mecanismo se movería sobre el eje z, así mismo se introdujo el valor del ángulo al Mux, de igual manera se realiza el mismo procedimiento para el ángulo del segundo eslabón. Este diagrama lo se puede apreciar en la Figura 94.

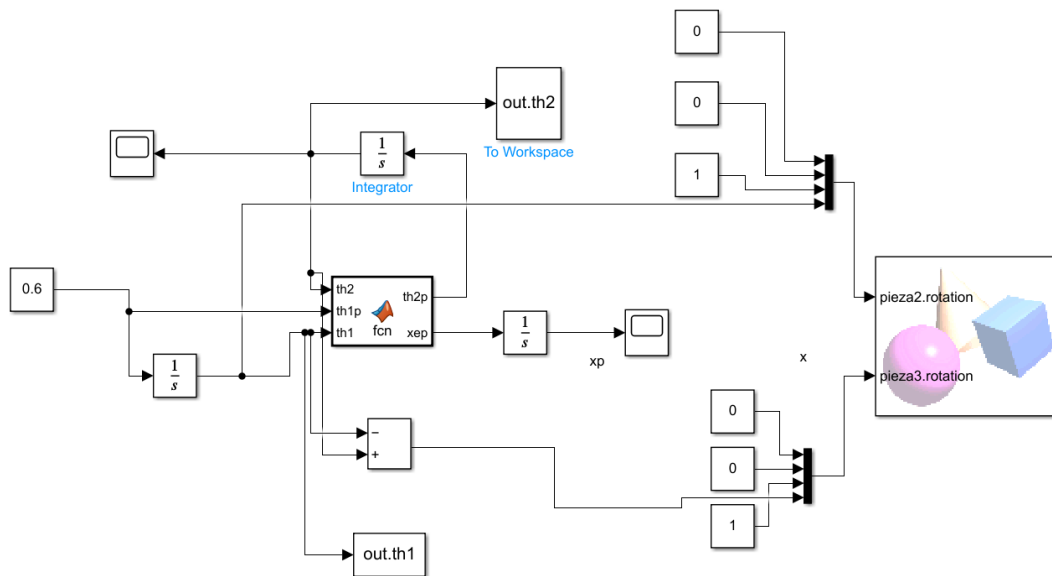


Figura 94. Diagrama para funcionamiento del mecanismo



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

En la Figura 95 se puede apreciar la simulación final del mecanismo biela-manivela-corredera completamente funcional.

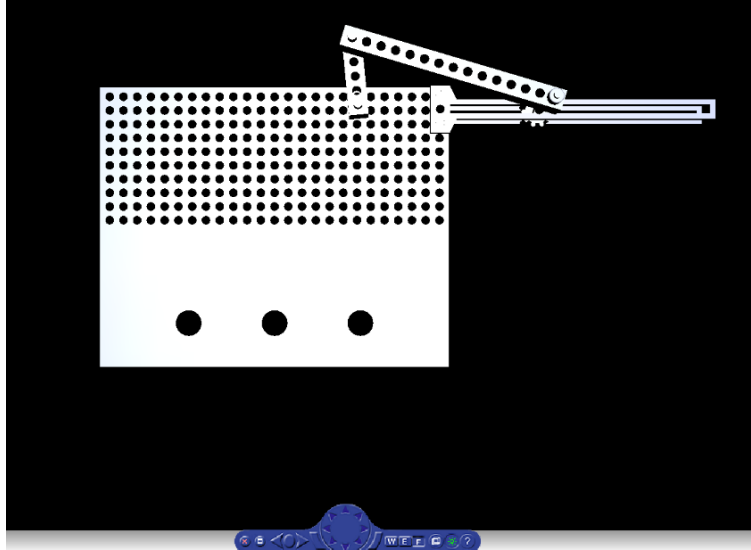


Figura 95. Visualización del movimiento en VRsink

Puesto que algunos mecanismos como los modelos de cuatro barras y el mecanismo de Whitworth tienen un rango donde toman dos posibles soluciones, fue necesario implementar una simulación distinta donde el rango de funcionamiento de los cinco mecanismos fuera la prioridad, haciendo un análisis de los ángulos de funcionamiento en simulink se encontró que el rango de los mecanismos de cuatro barras es de  $50^\circ$  posicionándose para algunos casos desde valores negativos, mientras que en otros el rango se mantuvo en valores positivos; Los casos en que el rango fue de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  son el mecanismo manivela-balancín y el mecanismo de Whitworth.

Al encontrar el rango de funcionamiento de los mecanismos se realizó un nuevo diagrama de bloques en simulink para cada uno de los cinco mecanismos, dicho diagrama de simulink interactúa con las ecuaciones de posición únicamente para situar los mecanismos en el instante en el que cambia el ángulo del primer eslabón, es decir mediante una Matlab-Funtion se mandan llamar las ecuaciones de posición que se encuentran en una función externa a la app, entregando como resultado las constantes de los ángulos de los demás eslabones que conforman al mecanismo, mediante la visualización se restaron constantes a los demás ángulos para hacer coincidir la simulación en el instante en el que el mecanismo toma el valor del ángulo de entrada.

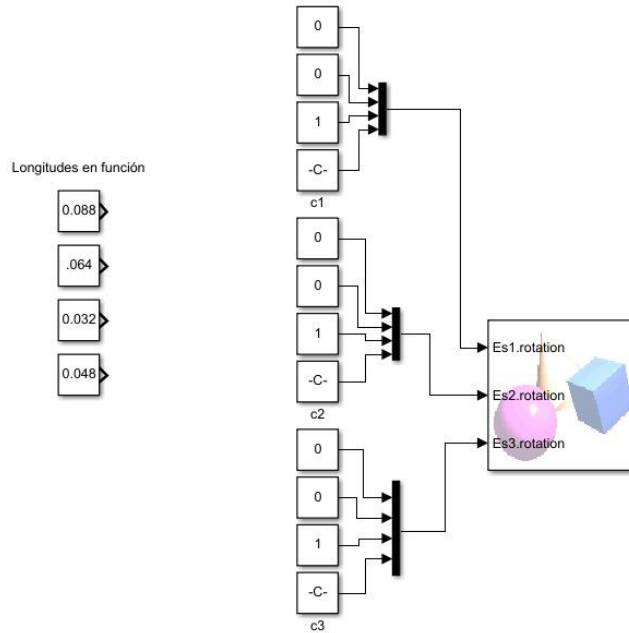


Figura 96. Bloques para simulación interactiva

Posteriormente se creó un nuevo diagrama en Simulink, en el cual se conectaron las constantes anteriormente calculadas mediante las funciones, sincronizándolas con una perilla que cambia el valor del rango de los ángulos, según corresponda al rango de cada mecanismo se cambia el valor de ángulos sumándoles una constante para mantener una posición que los haga estables, para cada uno de los cinco mecanismos se implementó el procedimiento descrito anteriormente obteniendo el resultado que se muestra en la Figura 97.

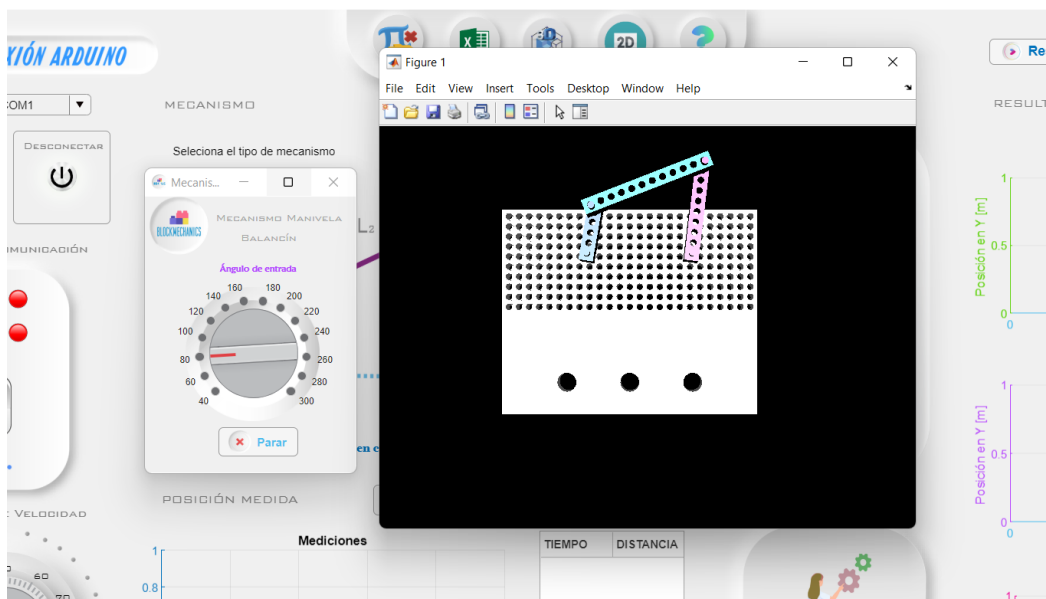


Figura 97. Implementación de simulación interactiva





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



#### 7.2.7.4 Implementación de interfaz gráfica

Al hacer el cambio de software se tuvo que realizar de nuevo la conexión con Arduino, esto se realiza mediante el uso de una Add-Ons de Matlab llamada **MATLAB Support Package for Arduino Hardware**. Esta se encuentra como se mencionó en el menú Add-Ons en la pestaña Home de Matlab.

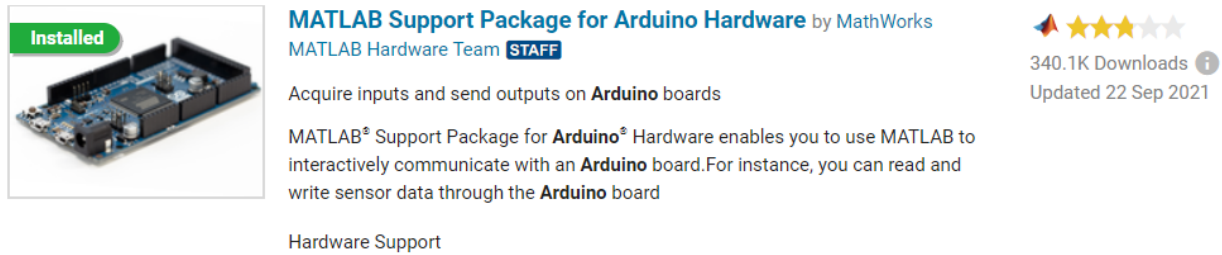


Figura 98. Add-Ons para conectar Arduino a Matlab.

Al descargar el Add-Ons mostrado en la Figura 98, Matlab permitirá configurar la tarjeta Arduino conectada, si es la primera instalación también instalará los drivers USB necesarios para el reconocimiento de la placa.

Al configurar la placa aparecerá una ventana en donde se debe seleccionar el tipo de comunicación, en este caso deberá usarse la conexión USB.

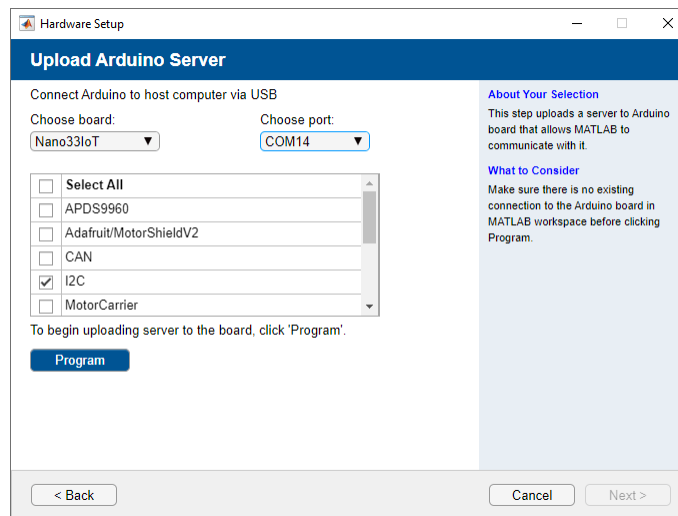


Figura 99. Configuración de placa

Después de realizar esto se deberá dar click en programar, si todo es correcto pedirá en una nueva ventana haces un test de prueba de conexión. Si aparece una palomita verde como en la Figura 100 es que la comunicación se está realizando correctamente y que la aplicación funcionará correctamente



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

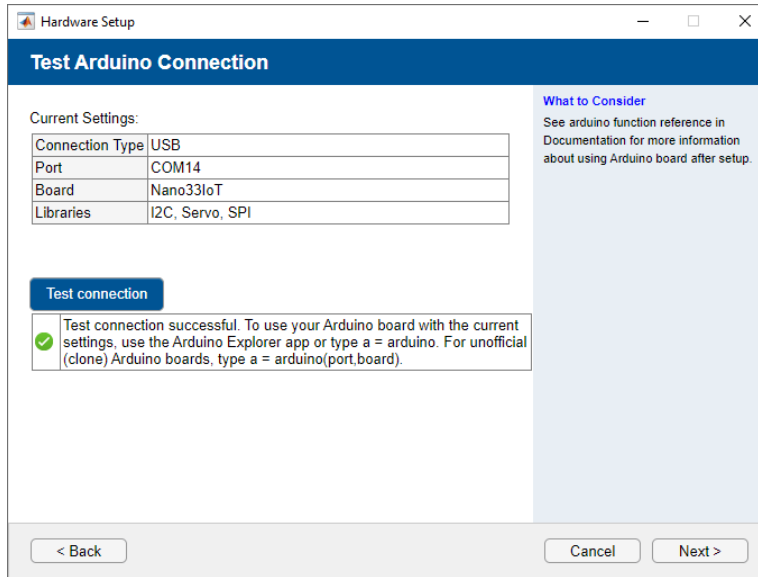


Figura 100. Test de conexión completo

La primera versión de la interfaz de comunicación es la que se muestra en la Figura 101. Se desarrolló mediante App Designer de Matlab. En esta interfaz solo era posible verificar la conexión del Arduino mediante un led que podía prender o apagarse desde la aplicación además de un PWM aplicado a un led para probar los códigos generados en Arduino.



Figura 101. Primera versión de interfaz de comunicación



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



Después esta interfaz pudo complementarse con una gráfica y una tabla donde se indicarían las mediciones realizadas de la posición de la corredera mediante el sensor láser seleccionado. Se implementaron al mismo tiempo algunos botones para exportar los datos de la tabla a un archivo de Excel en la carpeta de la aplicación.

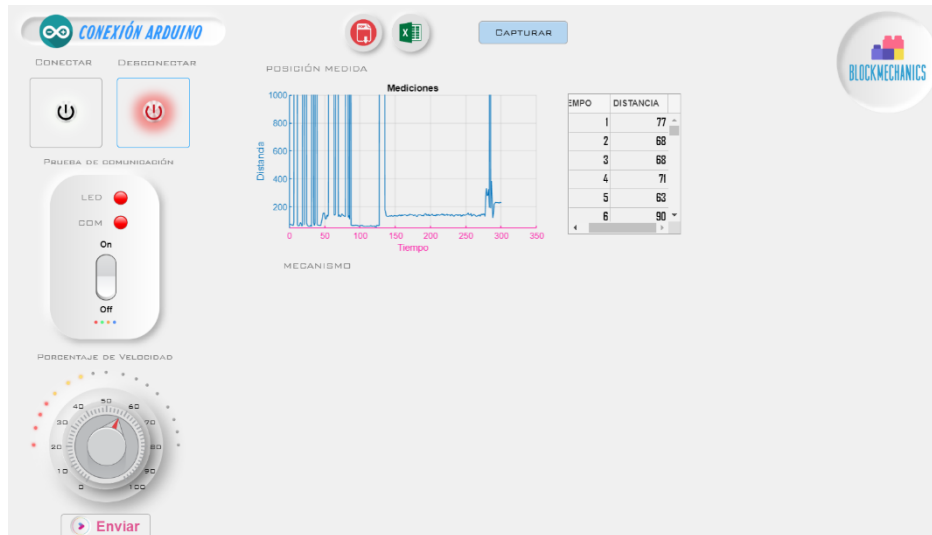


Figura 102. Interfaz con mediciones de sensor

En la tercera versión de la aplicación mostrada en la Figura 103, se agregó un DropDown que permite al usuario seleccionar el mecanismo a simular.

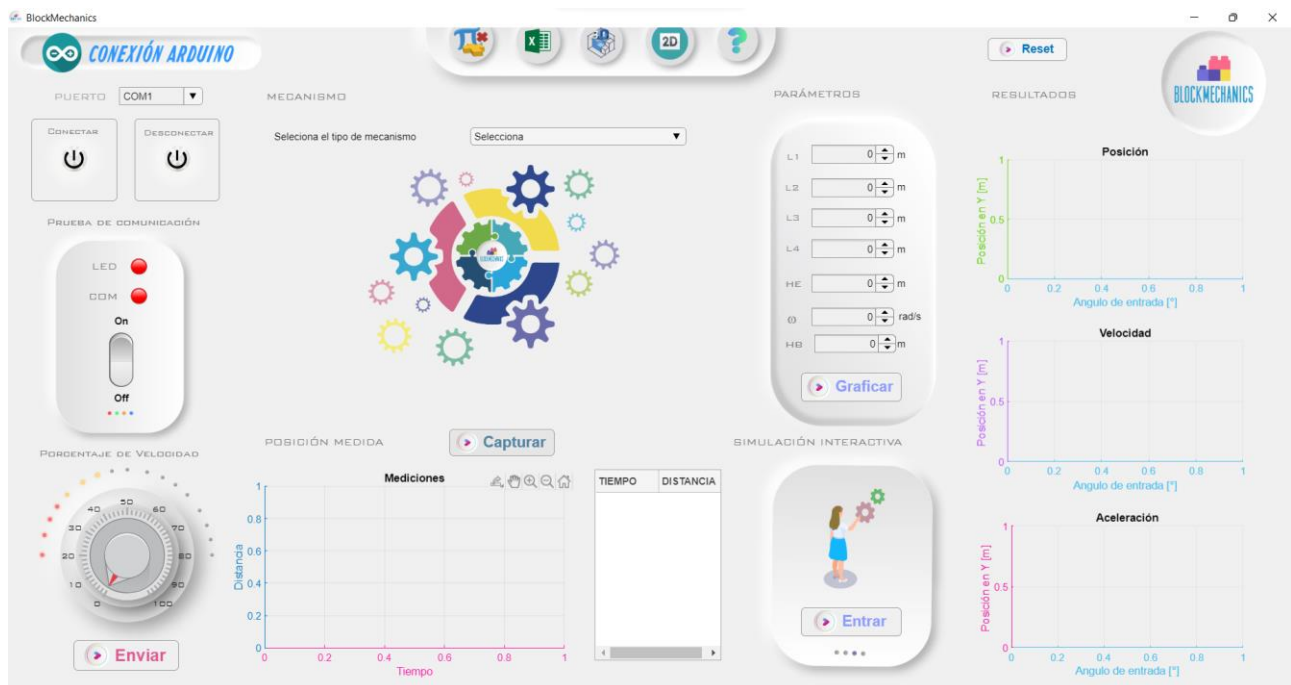


Figura 103. Versión 3 de la aplicación



## TRABAJO TERMINAL INGENIERÍA MECATRÓNICA

También en esta versión se agrega un módulo de simulación interactiva en donde se puede manipular algunos de los mecanismos diseñados en 3D mediante un knob de App Designer.

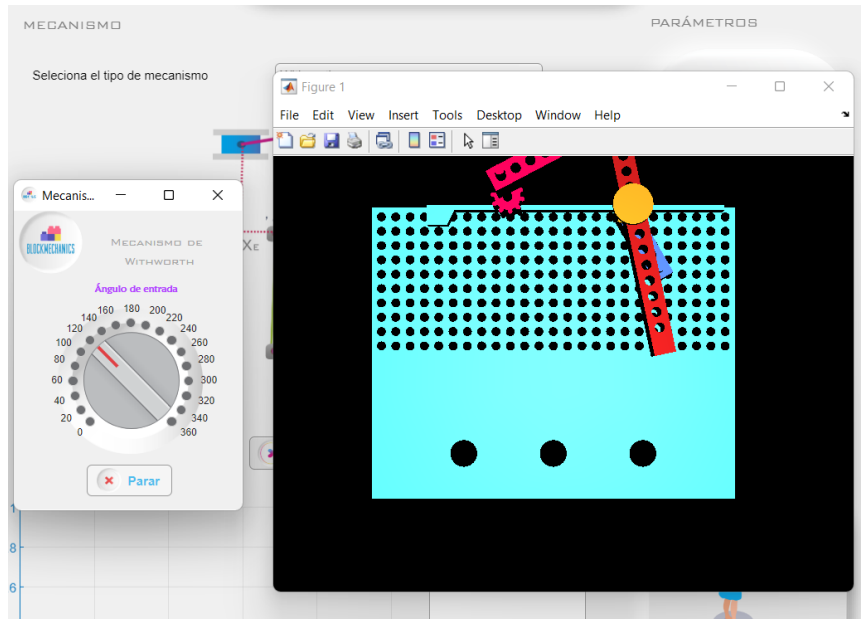


Figura 104. Simulación interactiva

En esta versión final se agrega una barra de herramientas la cual está diseñada para obtener información acerca del funcionamiento de la aplicación e información técnica de los mecanismos, además de visualizar los resultados de los cálculos ofreciendo distintas opciones para exportarlos y al mismo tiempo visualizar las simulaciones 2D y 3D de los mecanismos.



Este icono tiene como propósito visualizar una simulación de movimiento en dos dimensiones del modelo del mecanismo seleccionado, mostrando una idea clara al usuario de la interpretación del modelo matemático.



El icono de 3D tiene el propósito de reproducir una simulación realista del mecanismo seleccionado, es decir que en esta simulación se puede apreciar al mecanismo funcionando como si estuviera construido físicamente mediante un entorno de tres dimensiones. Los mecanismos compatibles con esta opción son: Biela manivela corredera descentrada y descentrada, yugo escocés y colisa oscilatoria interpretación del modelo matemático.



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



El icono de exportar datos permite trasladar los datos obtenidos en las graficas de posición, velocidad y aceleración a tablas de Excel, permitiendo al estudiante manipular los datos obtenidos para incorporarlos de una manera más cómoda y eficaz a sus reportes de prácticas solicitados por el docente.



Este icono tiene como propósito brindar apoyo al usuario respecto a la información técnica de los mecanismos y sus principios, mostrar las prácticas sugeridas para desempeñar un mejor aprendizaje además de brindar una guía rápida de uso de la aplicación.

Este último icono permitirá abrir una nueva ventana en donde el usuario tendrá las opciones de abrir las infografías en donde se explicarán los detalles más importantes de la app como la conexión con Arduino, el funcionamiento básico de la aplicación, las herramientas que la app presenta y la información acerca de la Ley de Grashof para que se puedan desarrollar los mecanismos de cuatro barras.



Figura 105. Mini App BLOCKMechanics



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



En el módulo de parámetros se podrán dimensionar las longitudes de los eslabones que comprenden al mecanismo, así como dar una velocidad angular para que se puedan realizar los cálculos.

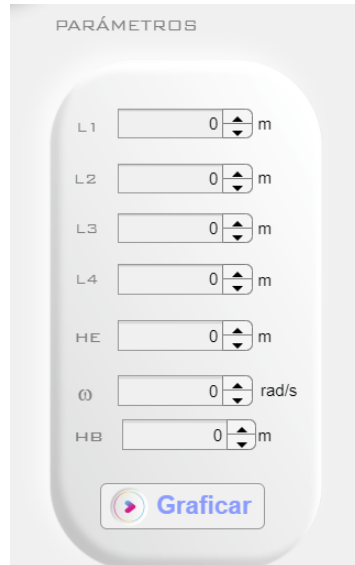


Figura 106. Simulación 2D y graficas de resultados

Ya que se hayan rellenado los campos necesarios es posible seleccionar el botón calcular para visualizar las gráficas de posición, velocidad y aceleración además con estos mismos datos puede graficarse en 2D el mecanismo seleccionado haciendo us del botón de simulación 2D, como se ve en la Figura 107.

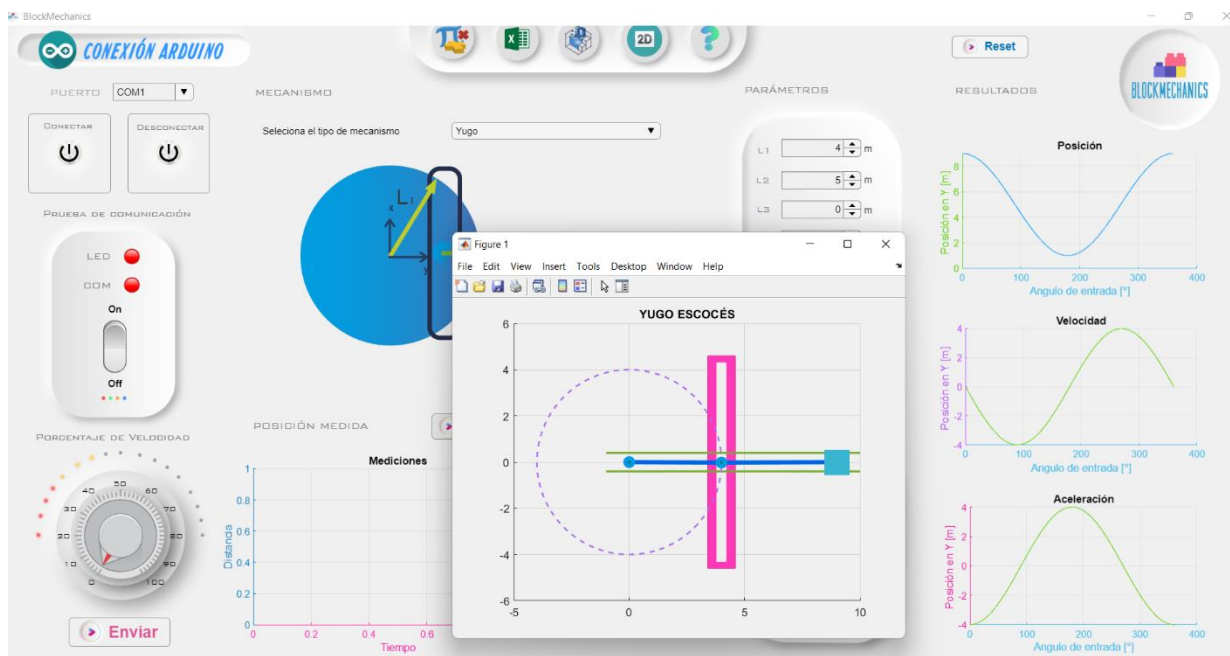


Figura 107. Simulación 2D y Graficación



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

Para poder manipular la velocidad del motor se hará uso de la sección de conexión Arduino, los botones conectar/desconectar permitirán hacer uso de la tarjeta Arduino, en este caso se usará la tarjeta ArduinoMega 2560.

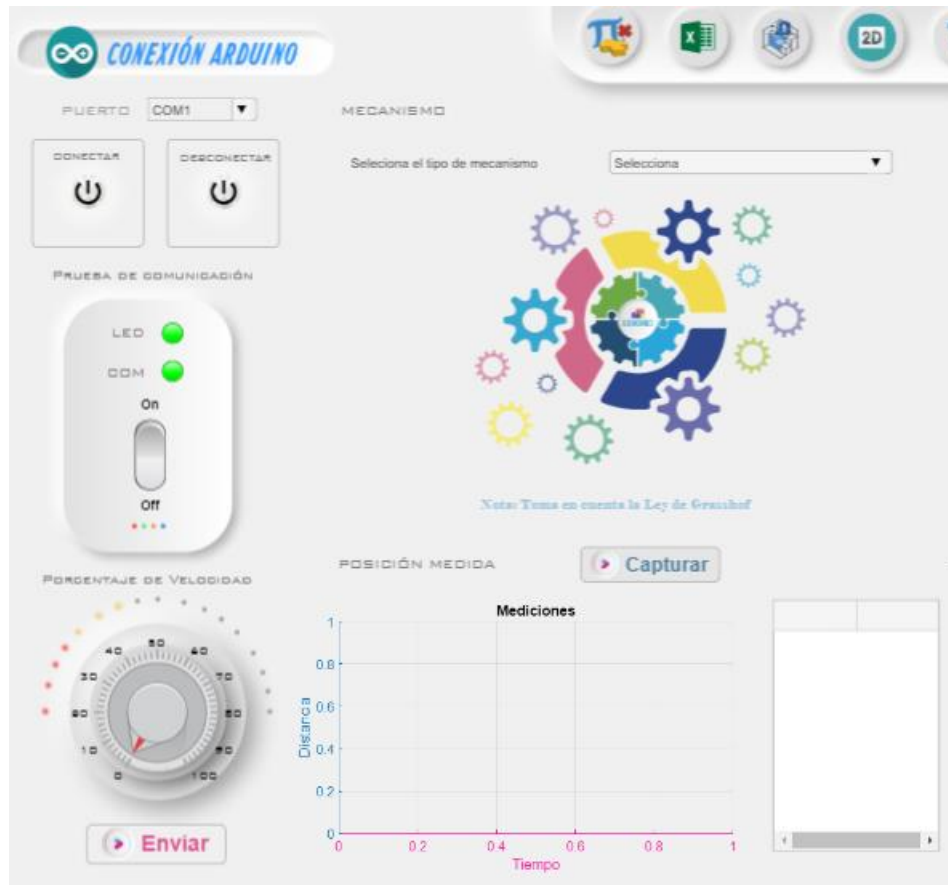


Figura 108. Sección conexión con Arduino

El rocker switch permitirá encender y apagar el led que indicará si la conexión de Arduino está funcionando, si el led esta funcionando podrá hacerse uso de la perilla, que mandará el porcentaje de velocidad al motor del mecanismo físico.

En general esta configuración tiene como propósito crear una relación entre la simulación del mecanismo virtual con el mecanismo físico para que se puedan comprobar la forma de la gráfica del movimiento de manera virtual con los resultados físicos, basta con seguir las instrucciones para generar una conexión con Arduino, hacer la prueba de conexión en la app y posteriormente establecer la velocidad del mecanismo con la perilla de la aplicación.





TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

### 7.2.7.5 Implementación de código de Arduino

Para poder trabajar con el sensor seleccionado debe usarse una librería de Arduino esta librería será llamada con la siguiente línea `#include <VL53L0X.h>`.

```
#include <VL53L0X.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Wire.h>

VL53L0X sensor;
char tipo_serial=0;
int angulo;
int VADC;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.setTimeout(10);
  Wire.begin();
  pinMode(12,INPUT_PULLUP);
  pinMode(8,OUTPUT);
  pinMode(9,OUTPUT);
  digitalWrite(12,HIGH);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:

  while(Serial.available()){
    tipo_serial=Serial.read();
    delay(10);
    switch(tipo_serial){
      case 'e':
        digitalWrite(8,HIGH);
        break;
      case 'p':
        digitalWrite(8,LOW);
        break;
      case 'v':
        if (Serial.available()){
          angulo=Serial.read();
          analogWrite(9,angulo*255/100);
        }
        break;
      case 's':
        sensor.init();
        sensor.setTimeout(500);
        sensor.startContinuous();
        int distance
        =sensor.readRangeContinuousMillimeters();
        Serial.println(distance);
        delay(100);
        break;
    }
  }
}
```

Este código permitirá recibir las letras enviadas desde la app para poder detectar si se quiere prender o apagar el led, así como manipular la velocidad del motor. Deberá cargarse a la placa antes de usar la aplicación.

### 7.2.8 Control de cambios

Durante el desarrollo se presentaron los siguientes cambios:

- Se cambio el material a PLA para mejorar el precio de manufactura y la accesibilidad a su impresión.
- Se cambió el modelo de sensor por el tamaño, obteniendo, así como sensor final el modelo VI5310x. Su datasheet puede ser consultada en el ANEXO NO.2.

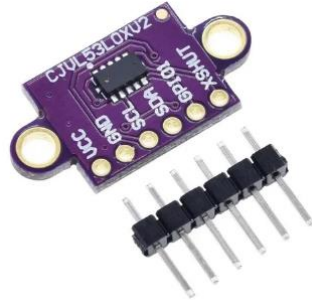


Figura 109. Sensor final VI5310

- Se hizo el cambio de software de LabVIEW a MATLAB.
- Se cambió la interfaz de conexión con Arduino que se realizó en TT1.
- 

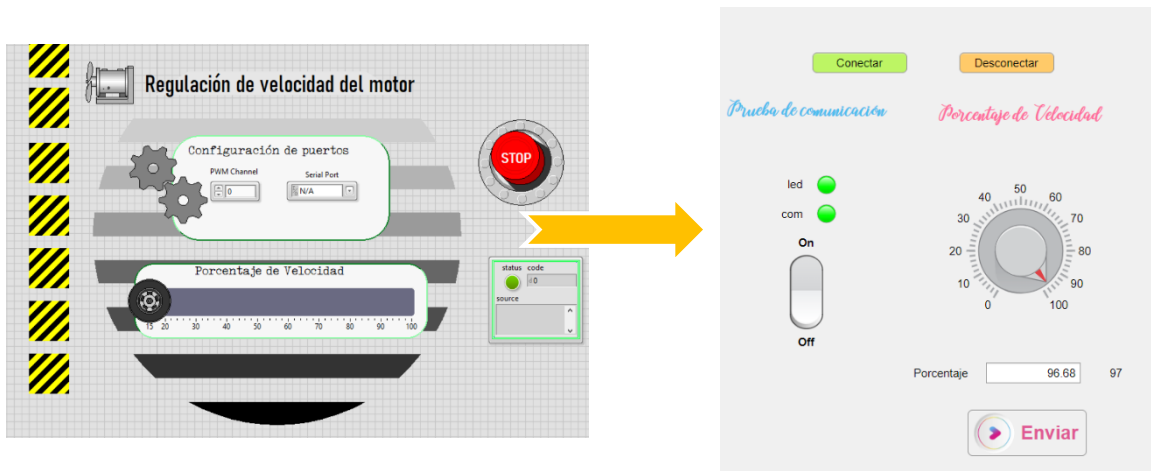


Figura 110. Desarrollo de interfaz de comunicación en Matlab

- Se cambió el diseño de los broches de los ejes para mejorar el aspecto de impresión igualmente se mejoró el acoplamiento hacia el motor.
- Se modificó la estructura de la corredera para sostener al sensor en la pieza.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



En resumen, los cambios se muestran a continuación en Tabla 39. Tabla de control de cambios

Tabla 39. Tabla de control de cambios

Material o actividad	Descripción del sustituto	Fecha	Conclusiones
<b>Desarrollo de interfaz gráfica en LabVIEW</b>	Se cambia de software a Matlab ya que permite con mayor facilidad programar y darle acceso al usuario a la aplicación desarrollada.	25/08/2021	Se debe cambiar la interfaz desarrollada en TTI para la comunicación con el Arduino. Y se abrió la posibilidad de usar un módulo para la operación del motor.
<b>Cambio de tipo de material de impresión 3D a PLA</b>	Se cambia el material	10/09/2021	Se redujo el costo de impresión y se aumentó el módulo de elasticidad de las piezas.
<b>Cambio de sensor</b>	Por medidas, rango de medición y precisión se cambia a un sensor laser	12/09/2021	Se realizó una nueva pieza para el ensamblaje del sensor dentro del mecanismo
<b>Cambio de estructura en mecanismo de Whitworth</b>	Se cambia la configuración de las piezas	20/09/2021	Se mejoró el ensamble para el modelo en simulación 3D en la aplicación para mejorar la visualización
<b>Cambio en el uso de método numérico</b>	Se usan las ecuaciones directas para el cálculo	03/10/2021	Facilidad de programación y uso de los métodos vistos en clase (ecuaciones de lazo) para repaso y mejorar la identificación de los temas por parte del usuario.



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

## 8 Administración del proyecto

### 8.1 Costos

Como se describió en los requerimientos, se definió que el valor del proyecto no rebasara los \$9,000.00 M.X.N con lo que se debieron seleccionar y presupuestar los siguientes componentes y materiales. Para realizar la parte física del mecanismo, la construcción se realizó por medio de la impresión 3D. Para la parte de costos se tomaron en cuenta todos los elementos que conforman el proyecto, tanto como la parte software, como la parte de construcción.

*Tabla 40. Costos del proyecto*

Estructura de costos				
Concepto	Cantidad	Unidad	Costo unitario	Costo Total
<b>CONSTRUCCION FISCA DEL MECANISMO</b>				
Eje del broche	2	Impresión 3D	\$ 5.00	\$ 10.00
Pernos	8	Impresión 3D	\$ 1.00	\$ 8.00
Bloques LEGO	16	Impresión 3D	\$ 10.00	\$ 160.00
Eslabón chico	1	Impresión 3D	\$ 20.00	\$ 20.00
Eslabón 12.3	1	Impresión 3D	\$ 20.00	\$ 20.00
Base parte 1	1	Impresión 3D	\$ 300.00	\$ 300.00
Base parte 2	1	Impresión 3D	\$ 400.00	\$ 400.00
Engrane	1	Impresión 3D	\$ 15.00	\$ 15.00
Malla	1	Impresión 3D	\$ 300.00	\$ 300.00
Eje 2	3	Impresión 3D	\$ 5.00	\$ 15.00
Eje 3	3	Impresión 3D	\$ 20.00	\$ 60.00
<b>MOVIMIENTO Y SENSADO DEL MECANISMO</b>				
Base motor	1	Impresión 3D	\$ 20.00	\$ 20.00
Adaptador motor	1	Impresión 3D	\$ 5.00	\$ 5.00
Motor	1	Electrónica	\$ 45.00	\$ 45.00
Base sensor	1	Impresión 3D	\$ -	\$ -
Sensor	1	Electrónica	\$ 94.00	\$ 94.00
<b>ELECTRONICA UTILIZADA</b>				
BJT 2N2222	1	Electrónica	\$ 2.00	\$ 2.00
Resistencia 330 Ω	1	Electrónica	\$ 1.00	\$ 1.00
Bornera	4	Electrónica	\$ 7.00	\$ 28.00
Led	1	Electrónica	\$ 2.00	\$ 2.00
Placa fenólica	1	Electrónica	\$ 15.00	\$ 15.00
<b>CONTROLADOR O MICROCONTROLADOR</b>				
Arduino UNO	1	Electrónica	\$ 350.00	\$ 350.00
<b>SOFTWARE / PLATAFORMA DE TRABAJO</b>				
SOLIDWORS	1	Software	\$ -	\$ -
MATLAB	1	Software	\$ -	\$ -
<b>COSTO TOTAL</b>				<b>\$ 1,870.00</b>



TRABAJO TERMINAL  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

El costo para realizar lo presentado en este Trabajo terminal es de \$1870.00 Este costo es 20.77% el presupuesto máximo asignado al inicio del proyecto. El costo total tomando en cuenta todas las piezas sería de \$2300.00. A este costo se le podría restar el costo del Arduino, ya que se espera que el usuario ya cuente con esta placa, por lo tanto, el proyecto final tendría un precio total de \$1950.00

### 8.2 Planeación y tiempos de actividades

Las actividades fueron distribuidas en dos semestres 2021/2 y 2022/2. Se dedicaron 18 semanas a la asignatura de Trabajo Terminal 1 en donde se desarrolló el diseño del dominio específico y otras 18 semanas a Trabajo Terminal 2 en la que se trabajó la fase de implementación.

Las horas dedicadas por integrante planeadas se muestran a continuación en la Tabla 41. Horas por integrante planeadas.

Tabla 41. Horas por integrante planeadas

INTEGRANTE	HORAS
LÓPEZ GALVAN KARINA DENNIS	1006
MORALES REYES OSCAR GERARDO	1006
VERONA CORONEL EDUARDO	1006

Al finalizar se hicieron las sumatorias de horas dedicadas las cuales se muestran en la Tabla 42 y en la Figura 111. Horas

Tabla 42. Horas reales dedicadas

	INTEGRANTE	HORAS
1	López Galván Karina Dennis	1240
2	Morales Reyes Oscar Gerardo	1230
3	Verona Coronel Eduardo	1220

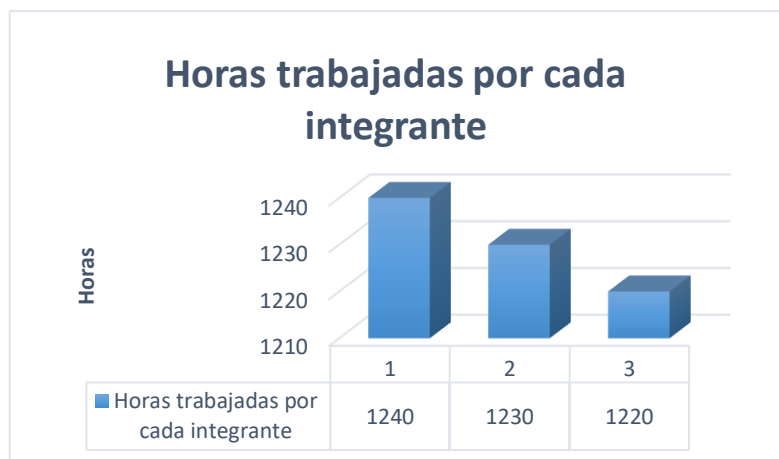


Figura 111. Horas dedicadas al proyecto



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

Con los datos presentados de las actividades realizadas se puede conocer el tiempo requerido para el desarrollo del proyecto tanto por etapa como por integrante del equipo. Con estos datos se creó una gráfica que muestre la división de tiempos, ésta se encuentra en la Figura 112.

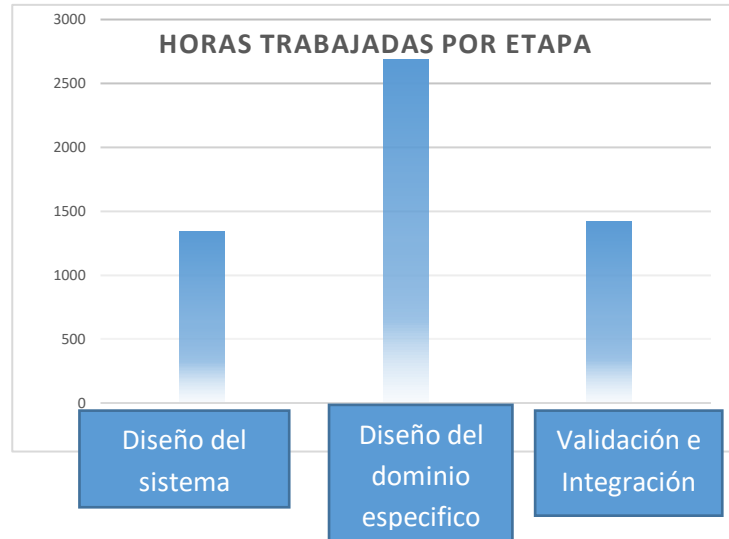


Figura 112. Horas de trabajo por etapa

Como se observa en la Figura a la sección que más se le dedicó tiempo fue a la de dominio específico ya que es en esta etapa cuando se debe analizar el sistema con ayuda de las áreas con las que ya se está familiarizado para así desarrollar las funciones del sistema de acuerdo con las unidades académicas. En la Figura 113 se puede ver que al diseño del sistema se le dedicó el mayor tiempo del proyecto. Esta es una etapa fundamental ya que es donde se desarrolló la posible solución con la que se trabajará, en base a las necesidades y requerimientos se definen las funciones, módulos y sistemas que conformarán al sistema propuesto.

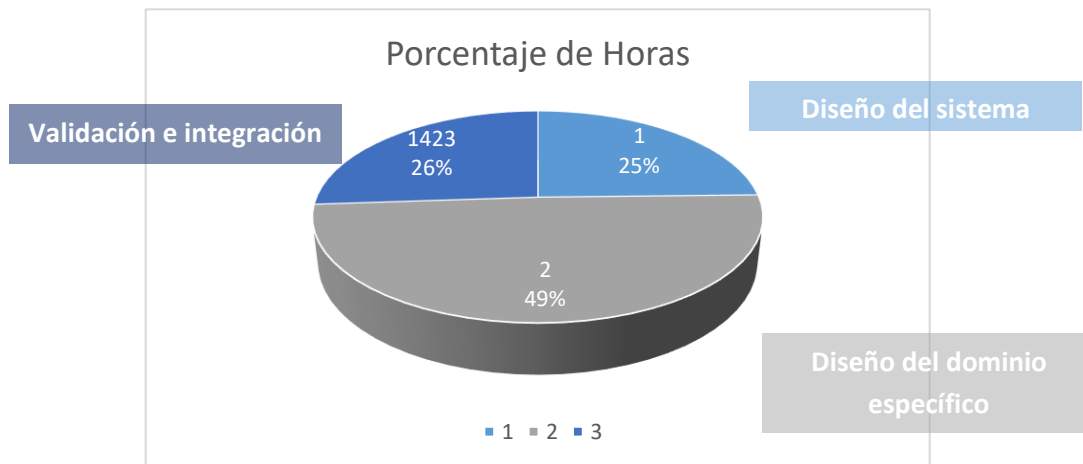


Figura 113. Porcentaje de horas



## 9 Conclusiones

El desarrollo de este proyecto fue basado en la metodología de diseño VDI-2206, logrando así el diseño, implementación e integración de una herramienta didáctica que permite construir y modelar un mecanismo físico y nueve virtuales que forman parte de los tópicos de la unidad de aprendizaje de Análisis y síntesis de mecanismos.

Este proyecto se llevó a cabo de acuerdo con los objetivos y a lo programado en el cronograma presentado en el protocolo de investigación y en el Trabajo terminal 1. A continuación se abordan los objetivos planteados para este proyecto y su resolución.

El primer objetivo fue: Diseñar y simular los bloques de construcción didácticos por medio de SolidWorks basándose en las medidas en piezas ya existentes en el mercado para el armado de manera física del mecanismo. Los planos de los eslabones, pernos, ejes y bloques se encuentran desde el ANEXO NO. 6 Plano eslabones al ANEXO NO. 13 Planos ejes, donde se puede observar detalladamente los diseños con las medidas de cada una de las piezas requeridas para el ensamble. Estas mismas piezas fueron impresas en 3D cumpliendo también con el objetivo: Manufacturar los bloques didácticos haciendo uso de la tecnología de impresión 3D para la verificación de su funcionamiento en el mecanismo.

Otro de los objetivos fue: Comparar y evaluar los componentes electrónicos adecuados a través de matrices multicriterio AHP para verificar que las soluciones son las más viables. Por lo cual en el capítulo 7.2.6.3 Selección del motor y 7.2.6.10 Selección de sensor de distancia se compararon y evaluaron los componentes electrónicos. Con base en estas matrices se eligió el transistor de la etapa de potencia, además de realizar la placa PCB en la sección 7.2.6.9 Diseño PCB para el buen funcionamiento del mecanismo físico, así mismo se seleccionó el motor y sensor, usando herramientas de selección de los proveedores. El motor fue seleccionado de acuerdo a los cálculos dinámicos. Los datasheets de los componentes seleccionados también encuentran del ANEXO NO. 1 DataSheet Transistor 2N2222 al ANEXO NO. 3 DataSheet Motor

Para el otro objetivo la elección del material se comparó y se evaluó el material adecuado a través del método de selección de materiales de M.F. Ashby para la manufactura de las piezas con el material y método más adecuado de acuerdo con los criterios definidos. En la sección 7.2.6.5 Selección del material, se pudieron comparar dos materiales recomendados por un proveedor de filamentos para impresión 3D. Se compararon específicamente el plástico ABS y el PLA, ya que estos materiales poseen las características necesarias para al proyecto; los bloques fueron impresos mediante impresión 3D usando material ácido poliláctico (PLA), con los mecanismos impresos es posible construir algunas variantes del mecanismo biela manivela corredera, así como la biela manivela corredera descentrada.

Para el siguiente objetivo: Estructurar la interfaz de trabajo apoyados de la ingeniería de software para que el usuario pueda interactuar con su mecanismo de manera virtual, se optó por usar el software Matlab para el desarrollo de la interfaz para poder darle mayor interacción al usuario. Se pudieron sincronizar los movimientos de los mecanismos 3D mediante las ecuaciones cinemáticas de cada uno de ellos, cumpliendo con el objetivo : Integrar e implementar los algoritmos del movimiento de los mecanismos a través del programa de MATLAB para la verificación de su comportamiento de manera virtual, esto puede observarse en el capítulo 7.2.7.3 Modelado virtual de los mecanismos mediante modelos matemáticos. Algunos





**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

mecanismos pueden ser usados mediante el bloque interactivo de la aplicación permitiendo al usuario ingresar el ángulo de entrada del mecanismo.

El siguiente objetivo desarrollar la programación adecuada que permita la comunicación del software con la tarjeta de desarrollo para la examinación de su comportamiento de manera física, se utilizó una tarjeta de desarrollo Arduino. Se configuró la comunicación entre Arduino y MATLAB mediante el uso de la Add-Ons de Matlab Support for Arduino. Permitiendo así la prueba de comunicación mediante un led y la manipulación de la velocidad del motor del mecanismo físico mediante un PWM, además de configurar los puertos. Este desarrolló puede verse en la sección 7.2.7.4 Implementación de interfaz gráfica.

Uno de los obstáculos que se enfrentaron durante el desarrollo fue el del cambio de software, ya que inicialmente se tenía planeado hacer el desarrollo de la aplicación en Labview pero al notar que había una solución más viable para el desarrollo y que al mismo tiempo facilitaría el uso de la aplicación para el usuario, se tomó la decisión de sustituir el software de desarrollo por Matlab utilizando el bloque Vrsink, el cual permitió desarrollar el entorno de simulación adecuado.

Otro problema que se presentó fue la impresión de las piezas ya que la empresa encargada de manufacturar las piezas no cumplió las medidas establecidas en Solidworks entregando las piezas con dimensiones distintas a las diseñadas, por lo que se tuvieron que modificar manualmente.

Como trabajo a futuro se propone:

- ✓ Lograr implementar los dos modos de uso (con perilla y con movimiento constante) para los 9 mecanismos presentados en el proyecto.
- ✓ Desarrollar el control de los mecanismos para verificar con el mecanismo físico los cálculos realizados por el software.
- ✓ Implementar todos los mecanismos físicamente mediante la impresión 3D.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
TRABAJO TERMINAL  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**



## **10 Anexos**



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
 UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS  
 AVANZADAS  
**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

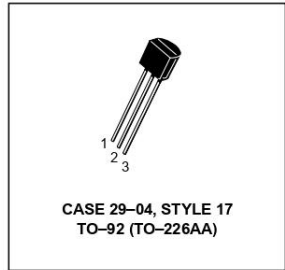
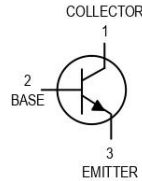


**ANEXO NO. 1 DataSheet Transistor 2N2222**

**MOTOROLA**  
 SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

Order this document  
 by P2N2222A/D

**Amplifier Transistors**  
 NPN Silicon



**MAXIMUM RATINGS**

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector–Emitter Voltage	$V_{CE0}$	40	Vdc
Collector–Base Voltage	$V_{CB0}$	75	Vdc
Emitter–Base Voltage	$V_{EB0}$	6.0	Vdc
Collector Current — Continuous	$I_C$	600	mAdc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	625 5.0	mW mW/°C
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	1.5 12	Watts mW/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-55 to +150	°C

**THERMAL CHARACTERISTICS**

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	200	°C/W
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	83.3	°C/W

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>				
Collector–Emitter Breakdown Voltage ( $I_C = 10 \text{ mAdc}, I_B = 0$ )	$V_{(BR)CEO}$	40	—	Vdc
Collector–Base Breakdown Voltage ( $I_C = 10 \mu\text{Adc}, I_E = 0$ )	$V_{(BR)CBO}$	75	—	Vdc
Emitter–Base Breakdown Voltage ( $I_E = 10 \mu\text{Adc}, I_C = 0$ )	$V_{(BR)EBO}$	6.0	—	Vdc
Collector Cutoff Current ( $V_{CE} = 60 \text{ Vdc}, V_{EB(off)} = 3.0 \text{ Vdc}$ )	$I_{CEX}$	—	10	nAdc
Collector Cutoff Current ( $V_{CB} = 60 \text{ Vdc}, I_E = 0$ ) ( $V_{CB} = 60 \text{ Vdc}, I_E = 0, T_A = 150^\circ\text{C}$ )	$I_{CBO}$	— —	0.01 10	$\mu\text{Adc}$
Emitter Cutoff Current ( $V_{EB} = 3.0 \text{ Vdc}, I_C = 0$ )	$I_{EBO}$	—	10	nAdc
Collector Cutoff Current ( $V_{CE} = 10 \text{ V}$ )	$I_{CEO}$	—	10	nAdc
Base Cutoff Current ( $V_{CE} = 60 \text{ Vdc}, V_{EB(off)} = 3.0 \text{ Vdc}$ )	$I_{BEX}$	—	20	nAdc





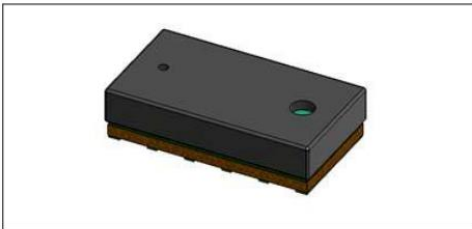
## ANEXO NO. 2 DataSheet sensor



## VL53L0X

World's smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection  
sensor

Datasheet - production data



### Applications

- User detection for personal computers/ laptops/tablets and IoT (energy saving)
- Robotics (obstacle detection)
- White goods (hand detection in automatic faucets, soap dispensers etc.)
- 1D gesture recognition.
- Laser assisted autofocus. Enhances and speeds up camera autofocus system performance, especially in difficult scenes (low light levels, low contrast) or fast moving video mode.

### Features

- Fully integrated miniature module
  - 940 nm laser VCSEL
  - VCSEL driver
  - Ranging sensor with advanced embedded micro controller
  - 4.4 x 2.4 x 1.0 mm
- Fast, accurate distance ranging
  - Measures absolute range up to 2 m
  - Reported range is independent of the target reflectance
  - Advanced embedded optical cross-talk compensation to simplify cover glass selection
- Eye safe
  - Class 1 laser device compliant with latest standard IEC 60825-1:2014 - 3<sup>rd</sup> edition
- Easy integration
  - Single reflowable component
  - No additional optics
  - Single power supply
  - I2C interface for device control and data transfer
  - Xshutdown (reset) and interrupt GPIO
  - Programmable I2C address

### Description

The VL53L0X is a new generation Time-of-Flight (ToF) laser-ranging module housed in the smallest package on the market today, providing accurate distance measurement whatever the target reflectances unlike conventional technologies. It can measure absolute distances up to 2m, setting a new benchmark in ranging performance levels, opening the door to various new applications.

The VL53L0X integrates a leading-edge SPAD array (Single Photon Avalanche Diodes) and embeds ST's second generation FlightSense™ patented technology.

The VL53L0X's 940 nm VCSEL emitter (Vertical Cavity Surface-Emitting Laser), is totally invisible to the human eye, coupled with internal physical infrared filters, it enables longer ranging distances, higher immunity to ambient light, and better robustness to cover glass optical crosstalk.



## TRABAJO TERMINAL INGENIERÍA MECATRÓNICA

### ANEXO NO. 3 DataSheet Motor

#### Especificaciones

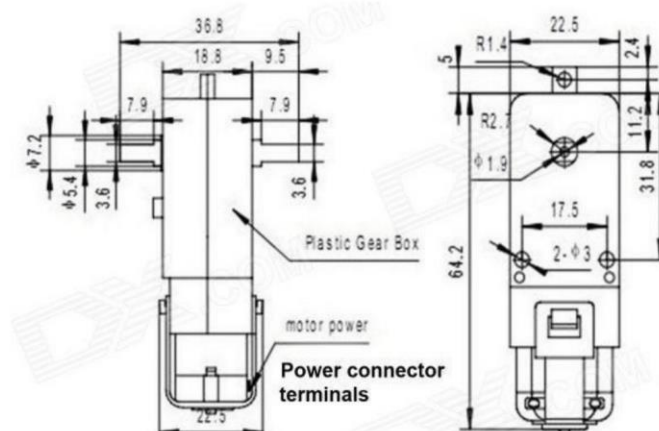
Voltaje:		3V	5V	6V
Parametros del motor (sin caja)	RPM	6000		
	Corriente	80 - 100ma		
	Reducción	48:1		
Parametros de caja reductora	Velocidad sin carga	125RMP	200RPM	230RPM
	Velocidad con carga	95RPM	160RPM	175RPM
	Torque de salida	0.8kg.cm	1kg.cm	1.1kg.cm
	Corriente	110-130ma	120-140ma	130-150ma
	Diámetro máximo de rueda	6.5cm		
	Dimensiones	70x22x18 mm		
	Peso	50g		
	Ruido	<65dB		

#### Información Técnica Motor Amarillo

(Fuente <https://saber.patagoniatec.com/>)

Voltaje de Operación	DC 3V	DC 5V	DC 6V
<b>Parámetros Caja Reductora</b>	Reducción	48:1	
Velocidad sin carga	125 RPM	200 RPM	230 RPM
Velocidad con carga	95 RPM	152 RPM	175 RPM
Torque de salida	0.8kg.cm	1.0kg.cm	1.1kg.cm
Velocidad del robot sin carga (metros/minuto)	25.9	41.4	47.7
Corriente	110-130mA	120-140mA	130-150mA
Diámetro máximo de llanta	6.5cm		
Dimensiones	70mm x 22mm x 18mm		
Peso	50g		
Ruido	<65dB		

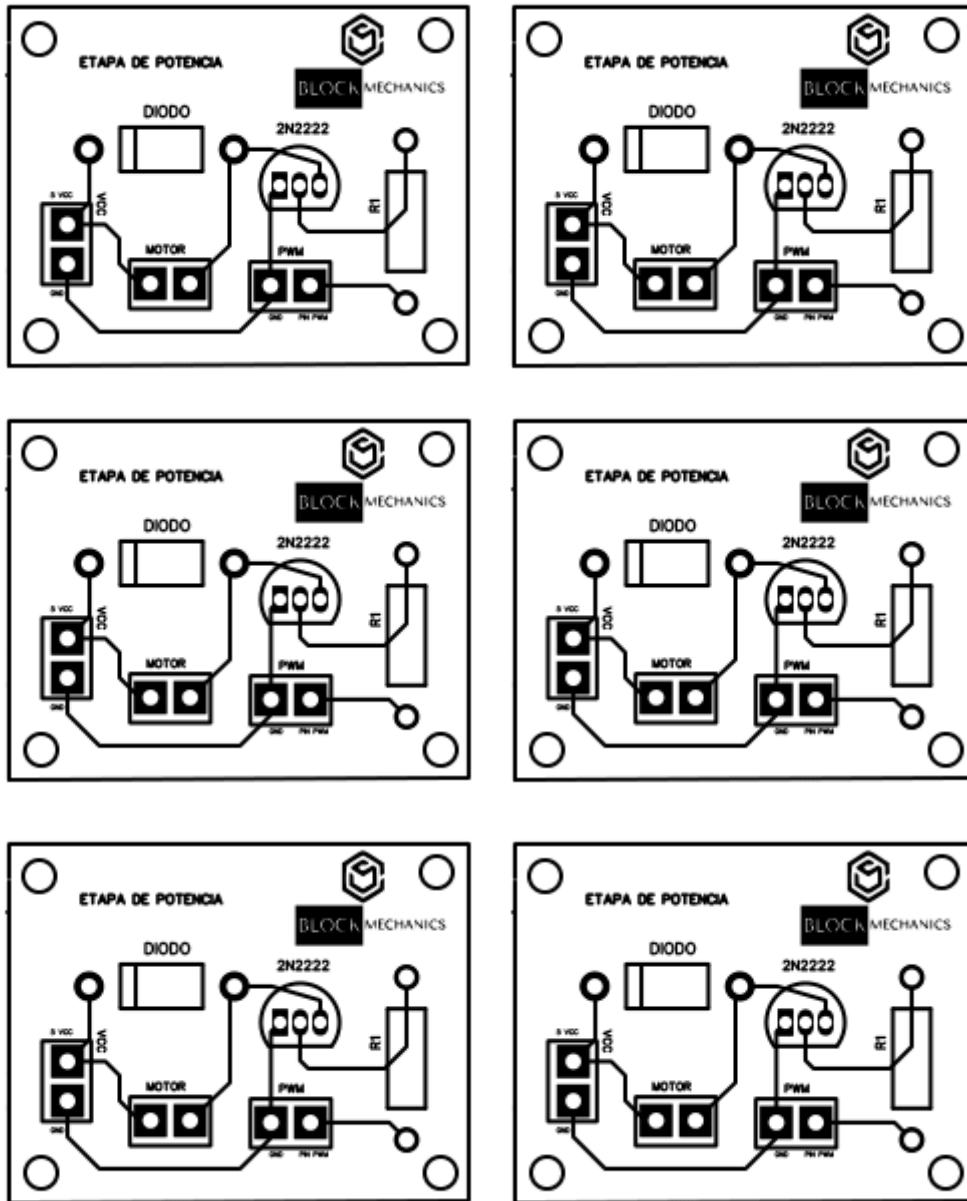
#### Dimensiones Del Motor Amarillo





TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

ANEXO NO. 4 Diseño PCB





**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**ANEXO NO. 5 Plano explosionado Biela manivela corredera**

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	base	1
2	3.SLDPRT-prueba	2
3	eje2	3
4	perno	12
5	eje del broche	2
6	goma	2
7	chica	1
8	12.3	1
9	engrane-prueba	1

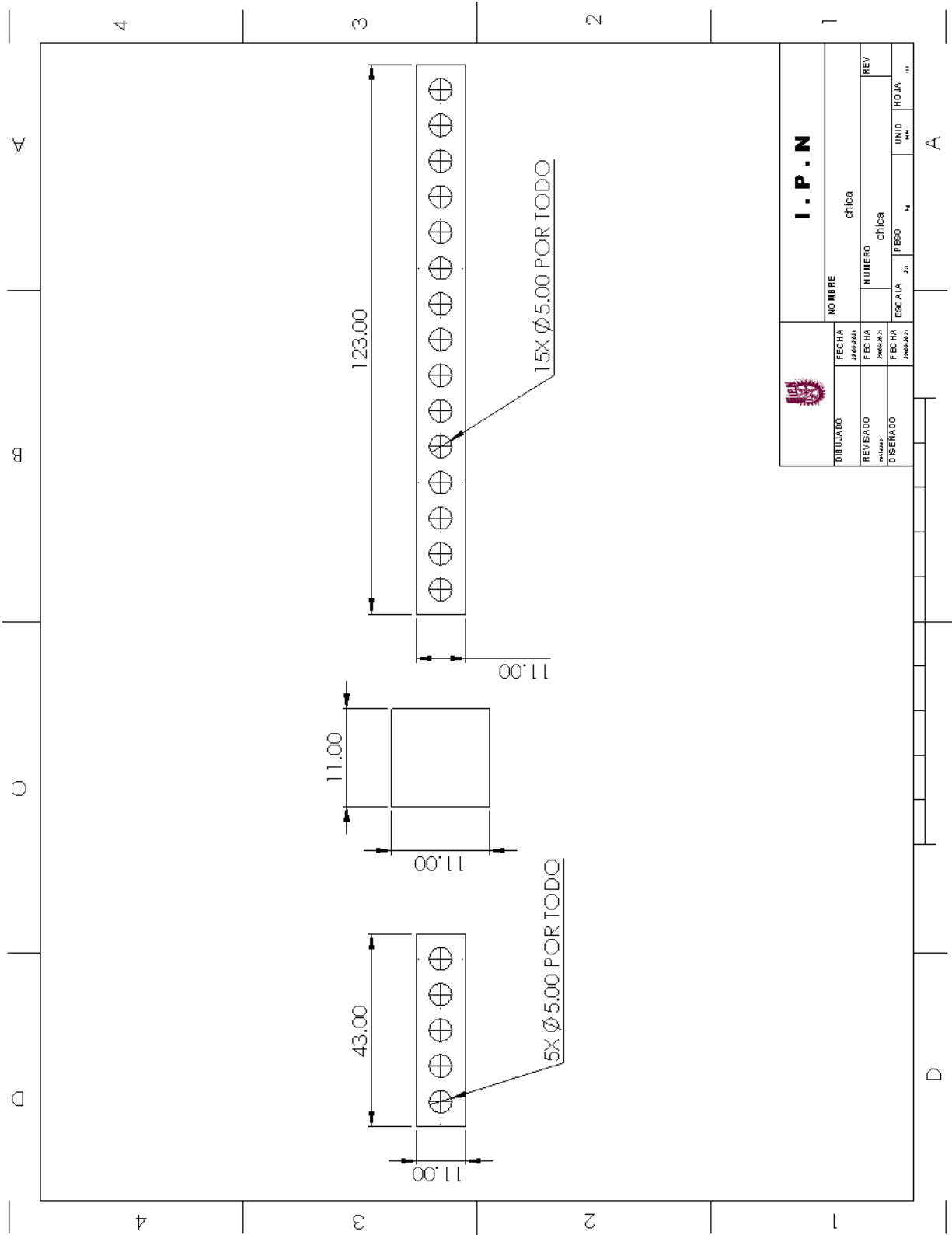
<b>I.P.N.</b>	
DIBUJADO: _____ REVISADO: _____ DISEÑADO: _____	FECHA: _____ FECHA: _____ FECHA: _____
NOMBRE: corredera-centrada NUMERO: corredera-centrada ESCALA: 1:1 PESO: 14 UNID: mm HOJA: 111	





TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

ANEXO NO. 6 Plano eslabones

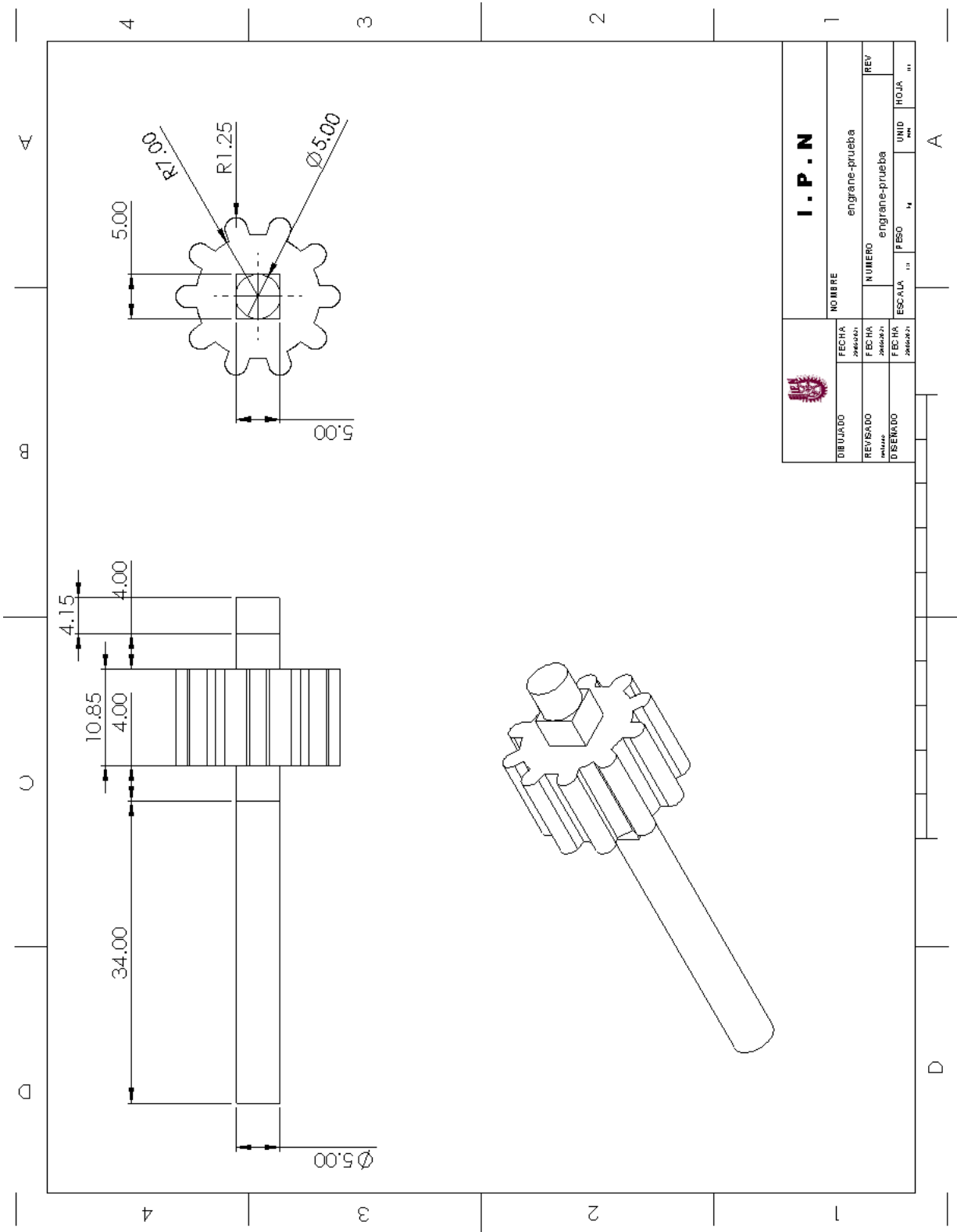


		<b>I . P . N</b>	
DIBUJADO	FECHA	NOMBRE	chica
REVISADO	FECHA	NUMERO	chica
DISEÑADO	FECHA	ESCALA	1/1
		PESO	1/1
		UNID.	1/1
		HOJA	1/1
		REV	



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

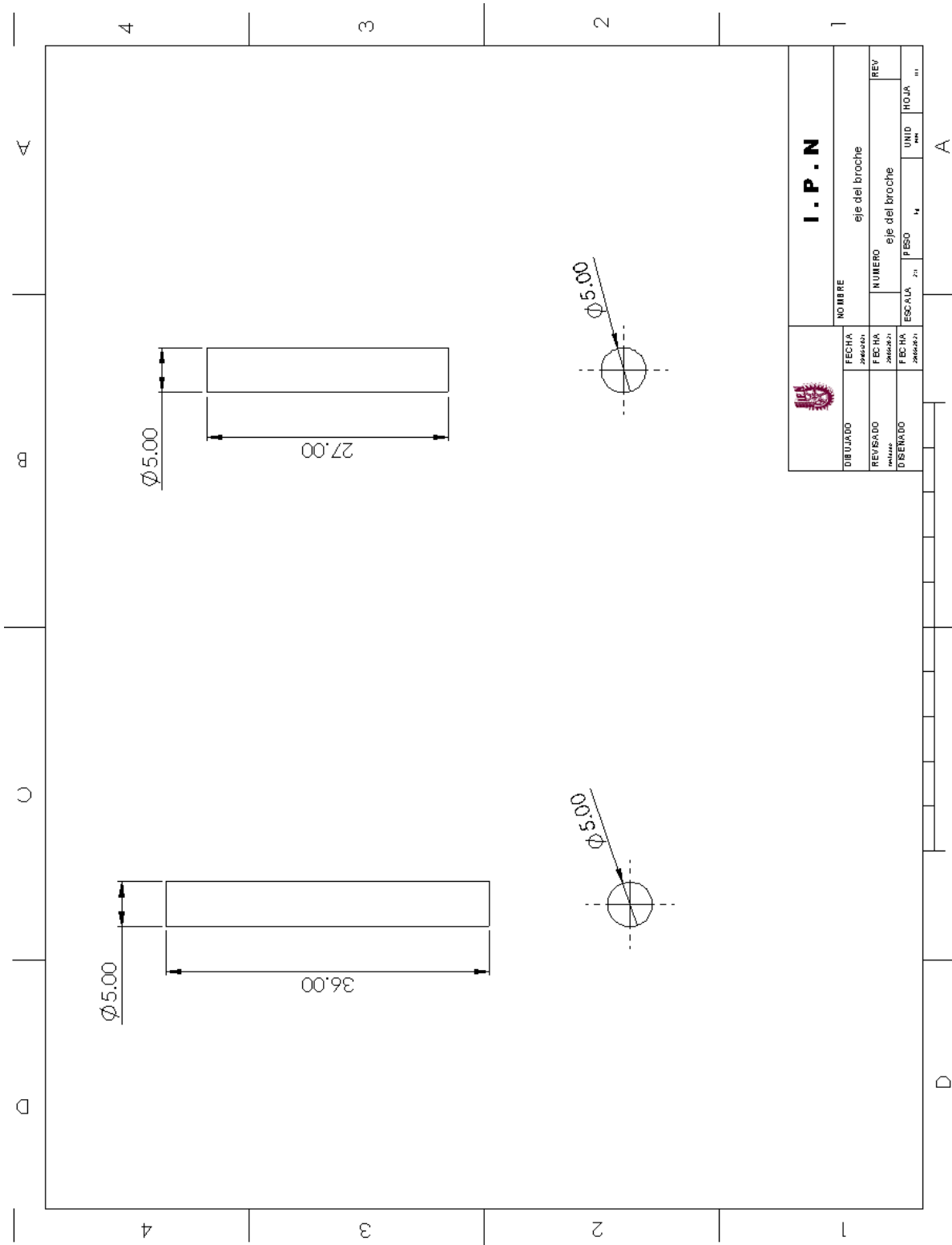
ANEXO NO. 7 Plano corredera virtual





TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

ANEXO NO. 8 Plano Pernos

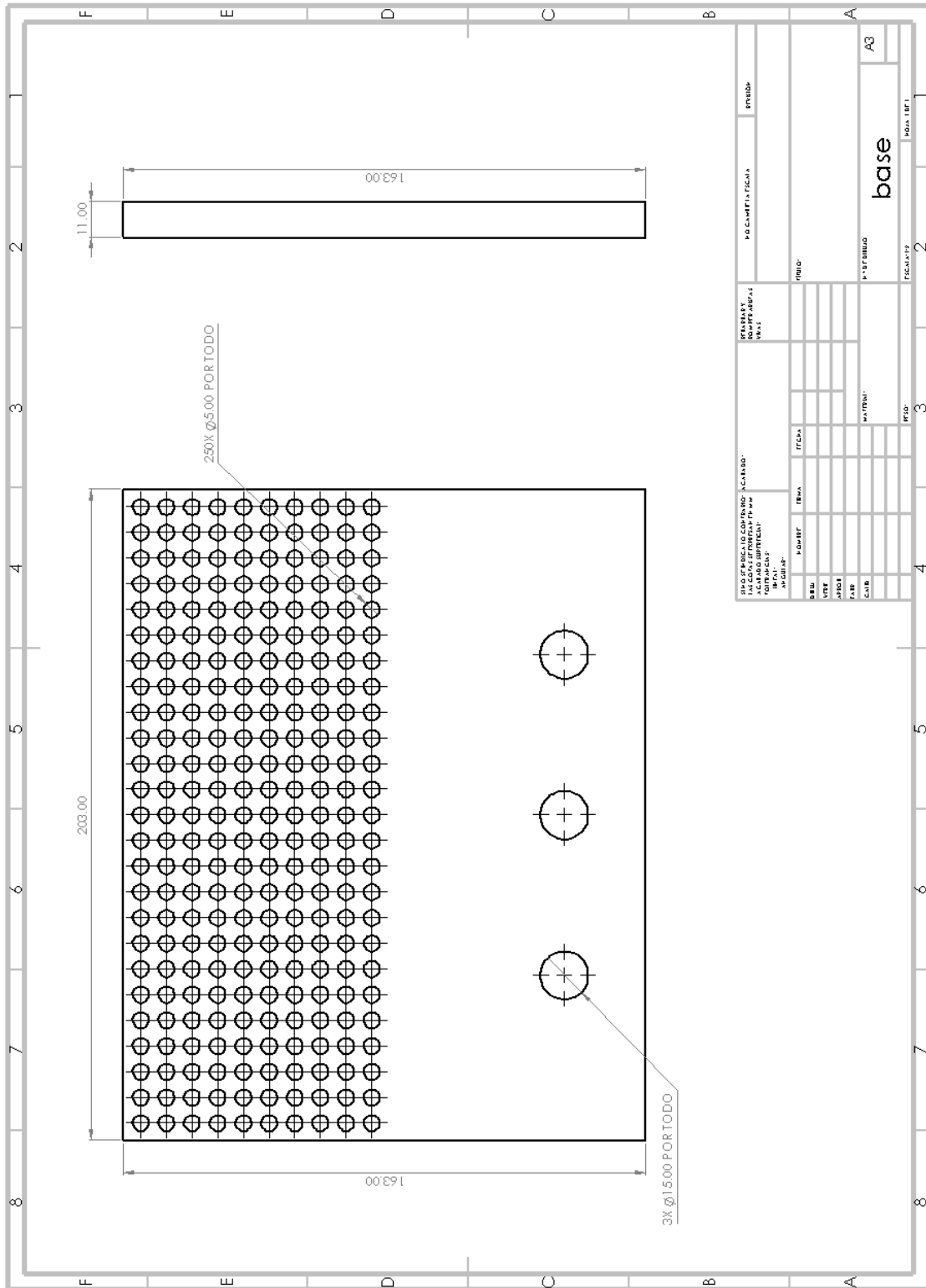


		<b>I . P . N</b>	
DIBUJADO	FECHA	NOBRE	eje del broche
REVISADO	F E C H A	NUMERO	eje del broche
0 BENEFICIO	F E C H A	ESCALA	PESO UNID HOJA



TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

ANEXO NO. 9 Plano base de ensamble

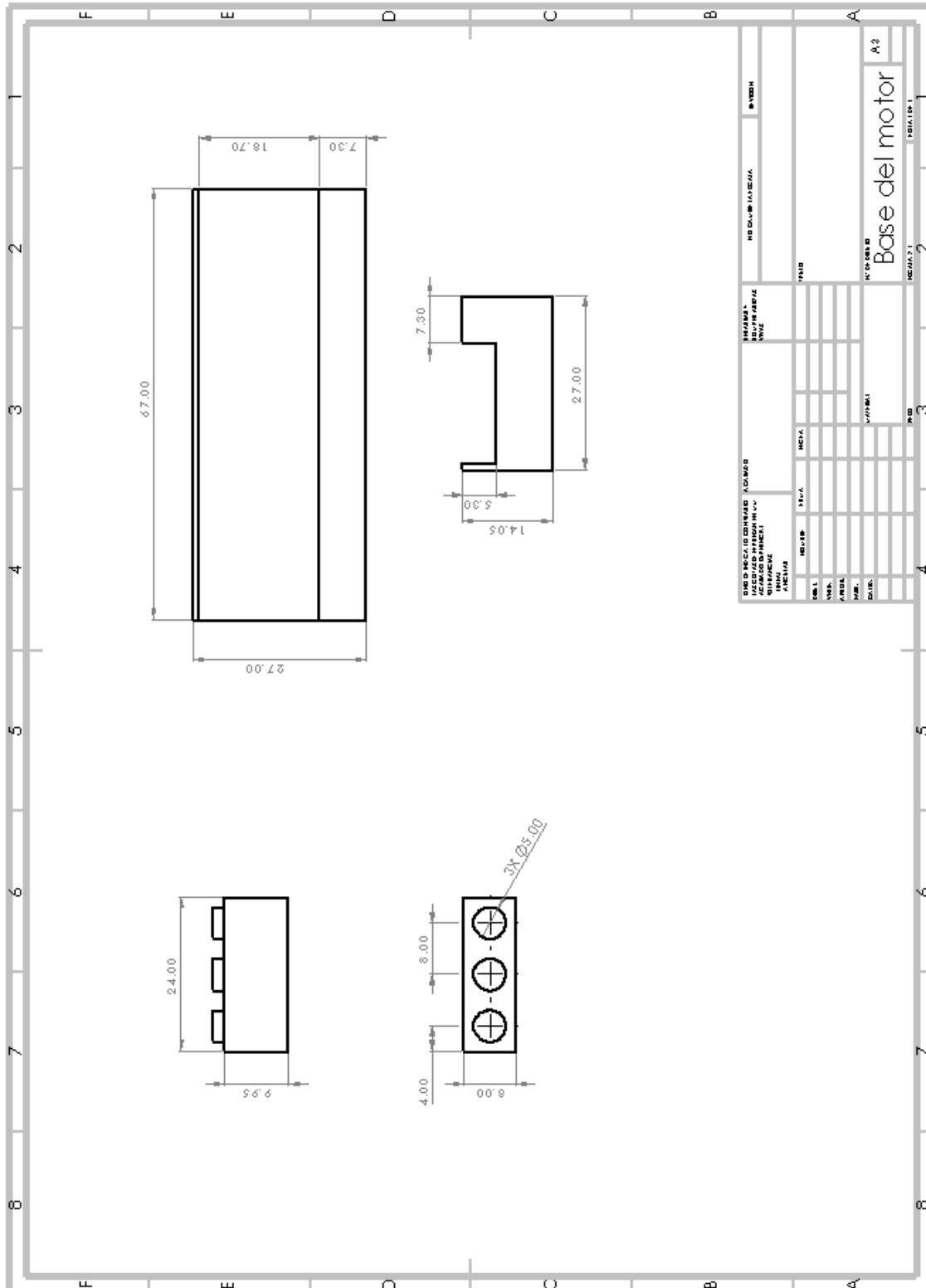






TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

ANEXO NO. 11 Plano base del motor



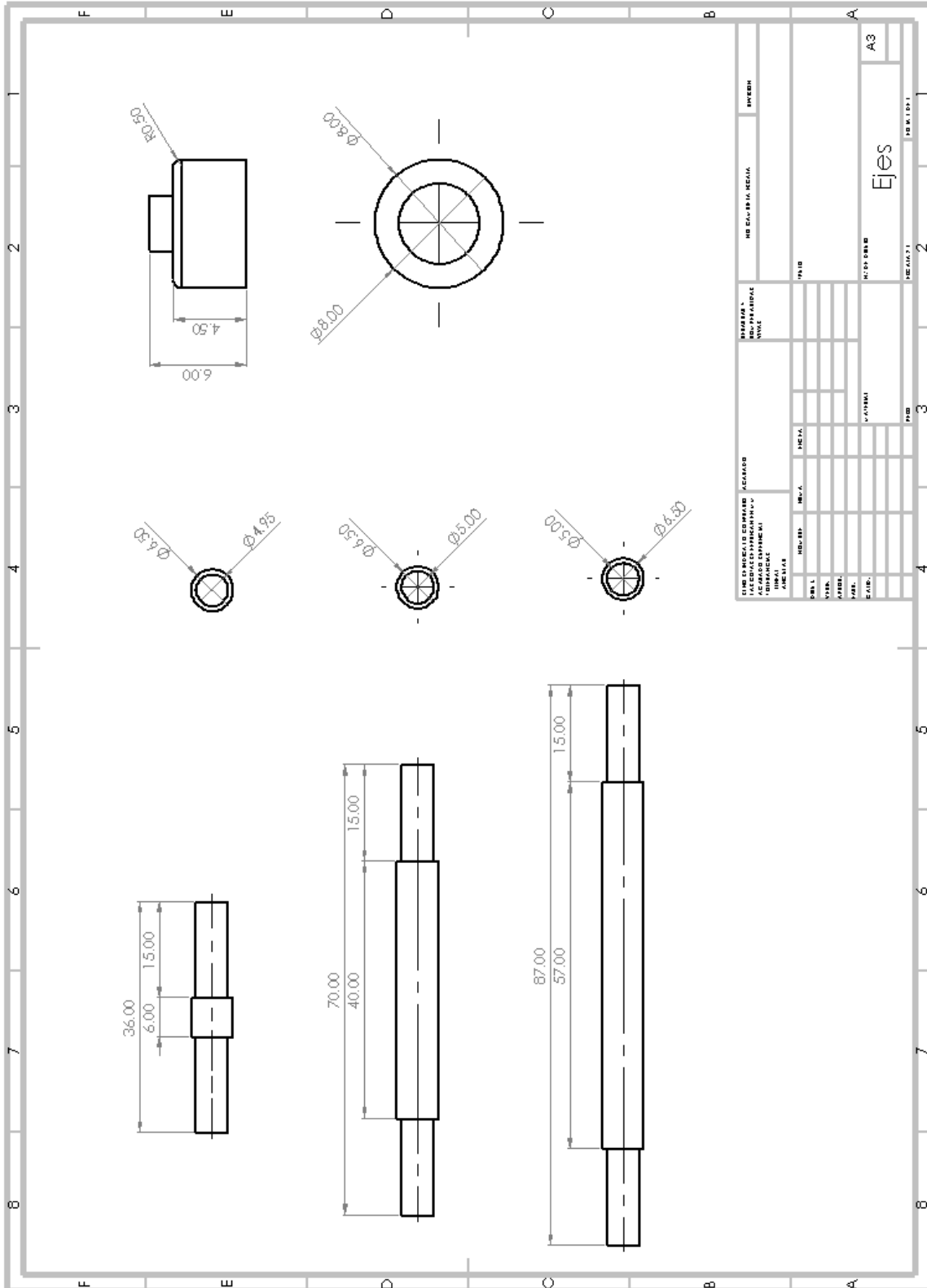






TRABAJO TERMINAL  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

ANEXO NO. 13 Planos ejes









TRABAJO TERMINAL  
 INGENIERÍA MECATRÓNICA

ANEXO NO. 16 Componentes Mecanismo de Whitworth

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	base w		1
2	matraca 2		1
3	matraca		1
4	cuadrocolisa		1
5	pieza 46		1

DISEÑO MECÁNICO DE COMPONENTES - INDICADOS		INDICADOS	
PROFESOR	INGENIERO EN MECÁNICA	INGENIERO EN MECÁNICA	INGENIERO EN MECÁNICA
ALUMNO	INGENIERO EN MECÁNICA	INGENIERO EN MECÁNICA	INGENIERO EN MECÁNICA
FECHA	INGENIERO EN MECÁNICA	INGENIERO EN MECÁNICA	INGENIERO EN MECÁNICA
GRUPO	INGENIERO EN MECÁNICA	INGENIERO EN MECÁNICA	INGENIERO EN MECÁNICA
withworth		withworth	



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**ANEXO NO. 17 Componentes Manivela balancín**

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	matlabate		1
2	leje del broche		4
3	mediana		1
4	9.9		1
5	chica		1

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE GUATEMALA	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE GUATEMALA
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL	INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS	UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS
INGENIERÍA MECATRÓNICA	INGENIERÍA MECATRÓNICA
TRABAJO TERMINAL	TRABAJO TERMINAL
N.º DE OBRERO	N.º DE OBRERO
Ma-Ba	Ma-Ba
FECHA DE ENTREGA	FECHA DE ENTREGA
FECHA DE CALIFICACIÓN	FECHA DE CALIFICACIÓN
FECHA DE CALIFICACIÓN	FECHA DE CALIFICACIÓN







**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**ANEXO NO. 20 Componentes Mecanismo Chebyshev**

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	molibdeno		1
2	eje del broche		3
3	9.9		2
4	chica		1
5	eje 62		1

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS	ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA	SEMESTRE 2018-2019	GRUPO 01	TÍTULO Mecanismo Chebyshev	FECHA DE ENTREGA 15/05/2019
---	-----------------------------------	-----------------------	-------------	-------------------------------	--------------------------------





## 10. Referencias

- [1] ONU, «La Agenda para el Desarrollo Sostenible,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>. [Último acceso: 01 10 2020].
- [2] Monjaraz Jaime Cid, «Introducción a la mecatrónica,» *Saberes y Ciencias*, nº 12, pp. 3-5, 2013.
- [3] *Saberes y Ciencias, Mecatrónica área multidisciplinaria e interdisciplinaria científica-tecnológica de la ingeniería moderna*, La Jornada de Oriente, 2013.
- [4] «Certificación PM,» 19 04 2019. [En línea]. Available: <http://www.certificacionpm.com/metodologia-lego-serios-play-lsp/>. [Último acceso: 30 10 2020].
- [5] Ana Lourdes Acuña, «Robótica y aprendizaje por diseño,» Fundación Omar Dengo-Costa Rica, [En línea]. Available: <http://www.educoas.org/portal/bdigital/lae-ducacion/139/pdfs/139pdf7.pdf>. [Último acceso: 30 10 2020].
- [6] Gabriela Diego Hernandez, «Desarrollo de escenarios Virtuales para Software de robótica,» 02 2017. [En línea]. Available: [http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/F5IPMGF45U6BJV7R11476HMS6KBNSUNFYKR93PI5CIL9PS2IQE-12152?func=service&doc\\_library=TES01&doc\\_number=000755299&line\\_number=0001&func\\_code=WEB-FULL&service\\_type=MEDIA](http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/F5IPMGF45U6BJV7R11476HMS6KBNSUNFYKR93PI5CIL9PS2IQE-12152?func=service&doc_library=TES01&doc_number=000755299&line_number=0001&func_code=WEB-FULL&service_type=MEDIA). [Último acceso: 29 10 2020].
- [7] Paulina Cecilia Barrón Sánchez, Aurelio Cortes López, «Programación con LEGO para la educación,» 09 2015. [En línea]. Available: [https://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/tlahuelilpan/licenciatura/documentos/tesis\\_programacion\\_con\\_lego\\_para\\_la\\_educacion\\_1\\_.pdf](https://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/tlahuelilpan/licenciatura/documentos/tesis_programacion_con_lego_para_la_educacion_1_.pdf). [Último acceso: 29 10 2020].
- [8] Pérez Zafrilla Borja, «Diseño mecánico, construcción virtual y simulación cinemática en Solidworks,» 2014. [En línea]. Available: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/53623/TFG%20BORJA%20PEREZ%20ZAFRILLA\\_14362205524713216646135157912705.pdf?sequence=2](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/53623/TFG%20BORJA%20PEREZ%20ZAFRILLA_14362205524713216646135157912705.pdf?sequence=2). [Último acceso: 35 09 2020].



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

- [9] Huitrón Ramírez Erick, Perea Rivera Víctor Hugo, Romero Anaya Jacobo de Jesús, «Prototipo de Sistema Modular Didáctico para el aprendizaje de Tópicos de Ingeniería Mecatrónica,» 2010.
- [10] Shigley, Joseph Edward, Teoría de Máquinas y Mecanismos, México: McGRAW-HILL., 2001, p. 19.
- [11] GUNT HAMBURG, «Mecánica y diseño mecánico,» [En línea]. Available: <https://www.gunt.de/es/productos/mecanica-y-diseno-mecanico/dinamica/cinematica/modelo-cinematico-mecanismo-de-biela-manivela/041.11000/ki110/glct-1:pa-150:ca-15:pr-953>. [Último acceso: 28 01 2021].
- [12] Reuleaux, Franz, Kinematics of Machinery, 1876.
- [13] Manuel Torres Reyes Victor, «Desarrollo de un mecanismo de cuatro barras para su uso en la enseñanza,» México, 2009.
- [14] Antonio Colla, «CAP. 2: Mecanismos Articulados 1,» [En línea]. Available: <http://mecafundamentos.blogspot.com/p/infofundamentos.html>. [Último acceso: 30 12 2020].
- [15] López, Jesús Lozano Monge y Francisco J. Soria, “Mestre a Casa” (Conselleria d'Educació Generalitat Valenciana)..
- [16] Ortiz Sanchez Edgar, «Tema 2 mecanismos de eslabones articulados Unefm,» 12 08 2019. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/edgargabrielortizsanchez/tema-2-mecanismos-de-eslabones-articulados-unefm>.
- [17] Oliver, Prof. Dr. José L, «Mecanismo de cuatro elementos articulados con colisa».
- [18] Chancúsig, Alex.
- [19] Ramirez, Arturo Castillo, «Cinematica de las Máquinas,» Universidad Autonoma de Aguascalientes, 2005. [En línea].
- [20] «Mecanismo de linea recta de Chebyshev,» 18 12 2020. [En línea]. Available: [http://www.mecapedia.uji.es/mecanismo\\_de\\_linea\\_recta\\_de\\_Chebyshev.htm](http://www.mecapedia.uji.es/mecanismo_de_linea_recta_de_Chebyshev.htm). [Último acceso: 30 12 2020].
- [21] Papert, Seymour. and Harel, Idit, Constructionism, Ablex Publishing Corporation, 1991.
- [22] Universidad Nacional de Rosario, Introducción al modelado de sistemas físicos.
- [23] Carliss Young Baldwin, Kim B. Clark, «Design Rules: The power of modularity,» 2000.



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

- [24] «Resolución del comportamiento de un mecanismo por Newton-Raphson,» [En línea]. Available: <https://html.rincondelvago.com/resolucion-del-comportamiento-de-un-mecanismo-por-newton-raphson.html#:~:text=Resoluci%C3%B3n%20del%20comportamiento%20de%20un%20mecanismo%20por%20Newton%2DRaphson,-An%C3%A1lisis%20Num%C3%A9rico&text=Objetivo%3A,un%20problem.> [Último acceso: 02 01 2020].
- [25] Verein Deutscher Ingenieure, «VDI 2206 - Design methodology for mechatronic systems.,» VDI-Handbuch Konstruktion., 2004.
- [26] «Introducción a labview, uso de estructuras y funciones básicas,» [En línea]. Available: <https://www.jobilize.com/course/section/conexiones-entre-los-diferentes-controles-e-instrumentos-by-openstax.> [Último acceso: 30 12 2020].
- [27] «Newton Raphson Zero Finder VI,» [En línea]. Available: [https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361G-01/gmath/newton\\_raphson\\_zero\\_finder/.](https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361G-01/gmath/newton_raphson_zero_finder/) [Último acceso: 02 01 2020].
- [28] Cross, Metodología de diseño, México: Limusa Wiley, 2002.
- [29] Thomas L. Saaty, Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation, RWS Pubns, 1872.
- [30] Thomas L. Saaty, Multicriteria Decision Making, 2da ed., Rws Pubns, 1990.
- [31] M. F. Ashby, 2011. [En línea]. Available: [www.grantadesign.com/education/resources.](http://www.grantadesign.com/education/resources.) [Último acceso: 05 06 2021].
- [32] Michael F. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design, Butterworth-Heinemann.
- [33] Granta Design, «Material property charts,» [En línea]. Available: [https://www.grantadesign.com/education/students/charts/.](https://www.grantadesign.com/education/students/charts/) [Último acceso: 03 06 2021].
- [34] bcn3d, «bcn3d,» [En línea]. Available: [https://www.bcn3d.com/es/material-selector/.](https://www.bcn3d.com/es/material-selector/) [Último acceso: 04 06 2021].
- [35] Infaimon, «¿Qué es el coeficiente de seguridad,» [En línea]. Available: [https://blog.infaimon.com/coeficiente-de-seguridad-filosofia-diseno/.](https://blog.infaimon.com/coeficiente-de-seguridad-filosofia-diseno/) [Último acceso: 05 06 2021].
- [36] Mouser Electronics Mexico , «Mouser Electronics Mexico,» [En línea]. Available: <https://www.mouser.mx/?gclid=Cj0KCQjw-->



GFBhDeARIsACH\_kdasjXTNkosvvKQiljdEsu6RAslYrOWpGBs-  
95OpZ1t67J\_6VhDZnKcaAt7BEALw\_wcB. [Último acceso: 03 06 2021].

- [37] IPC, «The Global Association for Electronics Manufacturing.» [En línea]. Available: <https://www.ipc.org/>. [Último acceso: 05 23 2021].
- [38] Digikey Electronics, «Digikey.» [En línea]. Available: <https://www.digikey.com.mx/es/products/detail/adafruit-industries-llc/4019/9808308?s=N4lgjCBcpgLFoDGUAuAnArgUwDQgPZQDa4ATABwCcYAzCALp4AOKUIAyugJYB2A5iAC%2BeMOTrQQySOmx5CkErDABWAOzkAbA2atIHbvyEjKVBjNSzcBYiAAM2kCzac0vAcJABaUmakey8iTKDIKhQA>. [Último acceso: 04 06 2021].
- [39] Engineer, «Download LINX - LabVIEW MakerHub.» [En línea]. Available: [https://www.ni.com/gate/gb/GB\\_EVALTLKTLINXLVH/US](https://www.ni.com/gate/gb/GB_EVALTLKTLINXLVH/US). [Último acceso: 23 05 2021].
- [40] VI Package Manager, «Download VIPM.» [En línea]. Available: <https://www.vipm.io/download/>. [Último acceso: 25 05 2021].
- [41] NI-VISA, «NI-VISA.» [En línea]. Available: <https://www.ni.com/es-mx/support/downloads/drivers/download.ni-visa.html>. [Último acceso: 25 05 2021].
- [42] Santos, N., & Fialho, F. A. P., Manual de análise ergonômica do trabalho, Curitiba, 1995.
- [43] Hans Marmolin, UI Design, A.B., «Ergonomía del software. Más allá del interfaz gráfico.» [En línea]. Available: <https://www.computerworld.es/archive/ergonomia-del-software-mas-alla-del-interfaz-grafico>. [Último acceso: 20 05 2021].
- [44] Roger S. Pressman, Ph.D., Ingeniería de software: Un enfoque práctico, Mc Graw Hill.
- [45] Mary Shaw, Software Architecture: Perspectives on an Emerging Discipline, Pearson, 1996.
- [46] García-Bullé, Sofía, «Legos y su papel como herramienta educativa estrella del siglo XXI,» *Tecnológico de Monterrey*, 07 03 2017. [En línea]. Available: [https://observatorio.tec.mx/edu-news/lego-educacion?utm\\_source=Newsletter+de+innovaci%C3%B3n+educativa+%28docentes%29&utm\\_campaign=def15e0c25-EMAIL\\_CAMPAIGN\\_2019\\_01\\_15\\_LDTEC\\_COPY\\_01&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_6e1a145e3e-def15e0c25-236539437](https://observatorio.tec.mx/edu-news/lego-educacion?utm_source=Newsletter+de+innovaci%C3%B3n+educativa+%28docentes%29&utm_campaign=def15e0c25-EMAIL_CAMPAIGN_2019_01_15_LDTEC_COPY_01&utm_medium=email&utm_term=0_6e1a145e3e-def15e0c25-236539437). [Último acceso: 30 10 2020].
- [47] «The Global Association for Electronics Manufacturing.» [En línea]. Available: <https://www.ipc.org/>. [Último acceso: 22 05 2021].



**TRABAJO TERMINAL**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

- [48] Labview MakerHub, «LINX,» [En línea]. Available:  
<https://www.labviewmakerhub.com/doku.php?id=libraries:linx:start>. [Último acceso: 23 05 2021].
- [49] National Instruments, «Fundamentos del Entorno de LabVIEW,» [En línea]. Available:  
<https://www.ni.com/getting-started/labview-basics/esa/environment#:~:text=Los%20programas%20de%20LabVIEW%20son,f%C3%ADsicos%2C%20como%20osciloscopios%20y%20mult%C3%ADmetros..> [Último acceso: 01 06 2021].